



DRUMMOND LTD.
COLOMBIA

ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD Y MONITOREO DE UNA ESCOMBRERA DE LA ZONA SUR MINA PRIBBENOW



ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD Y MONITOREO DE UNA ESCOMBRERA DE
LA ZONA SUR MINA PRIBBENOW

EMILIO JOSÉ CRUZ CUADRO
DRUMMOND LTD.

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA SEDE VALLEDUPAR
INGENIERÍA GEOLÓGICA
2018

ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD Y MONITOREO DE UNA
ESCOMBRERA DE LA ZONA SUR MINA PRIBBENOW

EMILIO JOSÉ CRUZ CUADRO

JUAN MIGUEL ORTEGA
INGENIERO EN MINAS MAGISTER EN INGENIERÍA GEOTECNIA Y
GEOMECÁNICA APLICADA EN MINERÍA

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA SEDE VALLEDUPAR
INGENIERÍA GEOLÓGICA
2018

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, gracias a Dios por quien fue posible terminar esta importante etapa de mi formación, como practicante geotecnista en el área de ingenierías. Gracias a la multinacional Drummond Ltd por depositar la confianza en mis capacidades y destrezas, y por brindarme el apoyo y patrocinio necesario para la realización de mi carrera durante los 10 semestres cursados, sin ella no habría sido posible este logro. Gracias a mi familia que creyó en mí, especialmente a mi madre y hermanos que fueron ese motor que me impulsó cada día a seguir creciendo y superar esos momentos en que quería dejarlo todo. Agradezco al ingeniero Santiago Morales, por transmitirme parte de su conocimiento y depositarme toda su confianza. Gracias a la Fundación Universitaria del Área Andina y su cuerpo de docentes por su aporte en mi formación como profesional, gracias a todas aquellas personas que me acompañaron en mis malos ratos, a los que por alguna razón olvidé, y a los que me vendieron como judas con un beso en la mejilla. A todos ellos mil y mil gracias...

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado especialmente a mi madre que gracias a su esfuerzo y dedicación logró impulsarme a ver el mundo desde otra perspectiva, sus consejos fueron la motivación que siempre me recordaban mi origen y mis metas a cumplir, a mis hermanos Roberto Carlos Cruz Cuadro, Néstor Alberto Cruz Cuadro, Carlos Mario Cruz Cuadro y María del Carmen Cruz Cuadro columnas principales y fortalezas de lo que hoy en día soy.

TABLA DE CONTENIDO

2. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA.....	13
2.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA	13
2.2. ASPECTOS ESTRATEGICOS.....	14
2.3. NUESTRAS POLÍTICAS Y COMPROMISOS	15
2.4. PROCESO DE PAZ Y POSCONFLICTO	16
2.4.1. Con Nuestros Empleados	16
2.4.2. Con la Comunidad	16
2.4.3. Con el Ambiente.....	16
2.5. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	17
3. INFORME DE LA PRÁCTICA	18
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA DEPENDENCIA EN LA QUE SE REALIZÓ LA PRACTICA	18
3.2. INFORME DE GESTIÓN	18
3.3. LOGROS ALCANZADOS.....	19
3.4. IMPACTOS PERCIBIDOS POR EL ESTUDIANTE.....	20
4. INTRODUCCIÓN	21
5. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	24
5.1. ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD Y MONITOREO DE UNA ESCOMBRERA DE LA ZONA SUR MINA PRIBBENOW	24
5.1.1. Descripción del problema.....	24
5.1.2. Justificación.....	24
5.1.3. Objetivo general	25
5.1.4. Objetivos especificos	25
5.1.5. Resultados esperados	25
5.1.6. Marco de referencia	26
5.1.7. Marco de antecedentes.....	26
5.1.7.1. Descripción del deslizamiento	27
5.1.7.2. Medidas correctivas relleno pared baja zona sur mina la loma:	31
5.1.8. Marco teórico.....	34
5.1.8.1. nomenclatura.....	34
5.1.8.2. conceptos básicos	34
5.1.8.2.1. Partes de un Talud	35
5.1.8.2.2. Deslizamiento	37
5.1.8.2.3. Partes de un Deslizamiento.....	37
5.1.8.2.4. Dimensiones de los movimientos	39
5.1.8.2.5. Ángulo de Desplazamiento	40
5.1.8.2.6. Ángulo y longitud de recorrido	41
5.1.8.2.7. Deslizamientos en Masa (Traslacionales y Rotacionales).....	42
5.1.8.2.8. Deslizamientos Compuestos de Traslación y Rotación.	46

5.1.8.3.	Caracterización de los movimientos	46
5.1.8.3.1.	Tipo de Material	47
5.1.8.3.2.	Humedad	47
5.1.8.3.3.	Estilo	48
5.1.8.3.4.	Estado de Actividad	49
5.1.8.3.5.	Secuencia de Repetición	50
5.1.8.3.6.	Velocidad del Movimiento	51
5.1.8.4.	Metodologías para el análisis de la estabilidad	53
5.1.8.5.	Características del análisis de límite de equilibrio	55
5.1.8.5.1.	Concepto de factor de seguridad (f. s.)	55
5.1.8.5.2.	Concepto de superficie de falla	56
5.1.8.6.	Parámetros utilizados en los análisis de límite de equilibrio	59
5.1.8.7.	Estabilidad a corto y a largo plazo	61
5.1.8.8.	Limitaciones de los métodos de límite de equilibrio	61
5.1.8.9.	Métodos límite de equilibrio	62
5.1.8.10.	Factores que influyen en la estabilidad de un talud	64
5.1.9.	Metodología	65
5.1.10.	Cronograma de actividades	66
5.1.11.	Localización	67
5.1.12.	Geología	68
5.1.12.1.	Marco geológico regional	68
5.1.12.2.	Estratigrafía	71
5.1.12.3.	Geología estructural	75
5.1.12.4.	Marco geológico local	76
5.1.12.4.1.	Estratigrafía local	77
5.1.12.5.	Principales estructuras geológicas de la mina	88
5.1.12.6.	Geología estructural local	89
5.1.12.6.1.	Pliegues	89
5.1.12.6.2.	Fallas	91
5.1.13.	Geotecnia	96
5.1.13.1.	Caracterización de materiales	96
5.1.13.2.	Criterios de falla	97
5.1.13.3.	Caracterización de suelos	98
5.1.13.4.	Parámetros geotécnicos adoptados	101
5.1.13.5.	Consideraciones de análisis	102
5.1.13.6.	Tipo de análisis y mecanismos de falla	109
5.1.13.7.	Análisis geotécnico de taludes y evaluación de la amenaza	110
5.1.13.8.	Criterio para la evaluación de amenaza	112
5.1.13.9.	Escenarios de análisis	112
5.1.13.10.	Mecanismos de falla	113
5.1.13.11.	Análisis de estabilidad	113
5.1.13.12.	Instrumentación y monitoreo	124
5.1.13.12.1.	Metodología	126
5.1.13.12.2.	Monitoreo del Movimiento del Talud	126

5.1.13.13.	Evaluación de la amenaza	130
6.	CONCLUSIONES	132
7.	RECOMENDACIONES.....	133
8.	REFERENCIAS	135
9.	ANEXOS	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de falla deslizamiento relleno pared baja zona sur Mina La Loma.....	28
Figura 2. Modelo tridimensional del deslizamiento.....	29
Figura 3. Modelo Tridimensional del área estabilizada	33
Figura 4. Nomenclatura de taludes y laderas	35
Figura 5. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.....	36
Figura 6. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo con IAEG Commission on Landslides (1990).....	40
Figura 7. Ángulo de desplazamiento (α).....	40
Figura 8. Longitud y ángulo de recorrido. (Hunter y Fell, 2003).	41
Figura 9. Efecto del volumen del deslizamiento en la longitud de recorrido. (Hunter y Fell, 2003).	41
Figura 10. Deslizamiento rotacional típico.	43
Figura 11. Desplazamiento de rotación en una ladera.	43
Figura 12. Deslizamientos sucesivos dentro de un movimiento general de rotación.....	44
Figura 13. Efectos de la estructura en la formación de los desplazamientos a rotación.	45
Figura 14. Deslizamiento de traslación.....	45
Figura 15. Esquema de una extensión lateral.	46
Figura 16. Desplazamientos rotacionales simples y múltiples.	48
Figura 17. Clasificación de los movimientos del terreno de acuerdo con su estado de actividad. (Bajracharya, 2006).....	50
Figura 18. Deslizamientos retrogresivos.....	50
Figura 19. Velocidad de acuerdo con el tipo de movimiento.	53
Figura 20. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante (U. S. Corps of Engineers, 2003).	57
Figura 21. Formas de la superficie de falla (U. S. Corps of Engineers, 2003).	57
Figura 22. Esquema de una grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio (U. S. Corps of Engineers, 2003).....	59
Figura 23. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.	64
Figura 24. Cronograma de actividades Realizadas.....	66
Figura 25. Mapa ubicación Mina Pribbenow y Área de estudio.....	67
Figura 26. Localización de la mina Pribbenow Mapa geológico generalizado de la Cuenca del Cesar – Ranchería (Tomado de USGS).....	68
Figura 27. Contextualización regional geodinámica que afecta el sector de la concesión La Loma. (Adaptado de Cediél, et al. 2003; Cortés & Angelier, 2005).....	69
Figura 28. Columnas estratigráficas, Correlaciones Formaciones Cesar y ranchería. ANH	71
Figura 29. Mapa sísmico estructural en profundidad (elevación en pies) de la base de la unidad portadora de carbón en la Sub-cuenca del Cesar (DrummondLtd).....	76
Figura 30. Mapa geológico local Mina Pribbenow (DrummondLtd).....	77
Figura 31. . Mapa Geológico concesión mina Pribbenow.Tomado de SGC PL48.....	78

Figura 32. Interpretación y Modelo Depositacional.	79
Figura 33. Mapa sismo estructural local Mina Pribbenow.	90
Figura 34. Cortes Geológico-Estructurales Mina Pribbenow Zona Sur Pit.....	91
Figura 35. Clasificación manto de arcilla.	98
Figura 36. mapa Actividad sísmica local.....	106
Figura 37. Buzamiento estratificación (piso Borrego).	108
Figura 38. Sectorización de la mina La Loma.....	111
Figura 39. Mapa localización secciones.	114
Figura 40. Secc1. Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal.	114
Figura 41. Secc1. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	115
Figura 42. Secc1. Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición pseudoestático.	115
Figura 43. Secc1. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición Pseudoestático.....	116
Figura 44. Secc2. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	116
Figura 45. Secc2. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	116
Figura 46. . Secc2. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.	117
Figura 47. Secc2. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.	117
Figura 48. Secc3. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	117
Figura 49. Secc3. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	118
Figura 50. Secc3. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.	118
Figura 51. Secc3. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.	118
Figura 52. Secc4. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	119
Figura 53. Secc4. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	119
Figura 54. Secc4. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.	119
Figura 55. Secc4. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.	120
Figura 56. Secc5. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	120
Figura 57. Secc5. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.	120

Figura 58. Secc5.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.	121
Figura 59. Secc5.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.	121
Figura 60. Secc1.Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal. Carga Sísmica Máxima Admisible.	123
Figura 61. Secc1.Talud con agua. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal con agua. Carga Sísmica Máxima Admisible.	124
Figura 62. Inverso de la velocidad vs tiempo de falla de un talud (Fukusono).	125
Figura 63. Mapa ubicación de prismas y Grietas.	130
Figura 64. Evaluación de amenaza. Falla circular y compuesta. Condición normal y extrema.	131

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Localización del área del deslizamiento	27
Fotografía 2. Rampa panamericana antes del deslizamiento.....	29
Fotografía 3. Escombrera Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 1.....	30
Fotografía 4. Escombrera Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 2.....	30
Fotografía 5. Relleno Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 3.....	31
Fotografía 6. Bancos de estabilización zona del deslizamiento.	32
Fotografía 7. Perfilado después del deslizamiento.....	32
Fotografía 8. Banqueo y perfilado terminado. zona después del deslizamiento.....	32
Fotografía 9. Formación Los Cuervos en el costado Sur del Pit minero.....	79
Fotografía 10. Contacto erosivo arenisca carbón. Note fragmentos de carbón e intraclastos de arcillolita en la arena. El diámetro del núcleo es de aproximadamente 5 cm).	81
Fotografía 11. Estratificación cruzada planar y en artesa a la base de un canal de arenas. Tomada en Rampa 3 de la pared del pit de Mina Pribbenow.....	81
Fotografía 12. Intercalaciones de limolita con laminación ondulosa y arcillolita.	82
Fotografía 13. Intercalaciones de arcillolita con láminas gruesas de arenisca. Note la abundante bioturbación con dominancia de madrigueras verticales.....	83
Fotografía 14. Arquitectura litofacial en una pared de Mina Pribbenow.....	84
Fotografía 15. Segmento con dominancia de facies de llanura inundación representado por litologías (arcillolitas). Note el contacto neto sobre facies ricas en materia orgánica. (Manto Rouzaud en Mina Pribbenow, Los lentes más competentes corresponden a depósitos de desbordes distales.	84
Fotografía 16. Fragmentos de plantas en arcillolita carbonosa.....	85
Fotografía 17. . Horizonte fosilífero de fauna marina (gasterópodos y bivalvos) en arcillolita.	86
Fotografía 18. Capa de arcillolita plástica de 1.5' de espesor, a la base de una canal de arenisca de relativa alta permeabilidad.	87
Fotografía 19. Depósito Aluvial. Mina La Loma.....	88
Fotografía 20. Falla Conveyor en el sector Norte de la mina Pribbenow desplazando estratos de la Formación Los Cuervos.....	92
Fotografía 21. Falla San Antonio cortando la formación Cuervos (E1c) en dirección E-W.....	93
Fotografía 22. Falla La Cruz cortando F. Cuervos, sector sur Mina Pribbenow.....	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Informe de funciones.	19
Tabla 2. Monitoreo Relleno Pared Baja Sector Sur Mina La Loma.	28
Tabla 3. Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes - 1996).	52
Tabla 4. Metodologías utilizadas en la modelación de taludes.	54
Tabla 5. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.	63
Tabla 6. Resumen de las principales características de las fallas en El Boquerón.	95
Tabla 7. Resultados de laboratorio mantos de arcilla (ensayo de corte directo).	99
Tabla 8. Parámetros geotécnicos adoptados para suelos y roca.	101
Tabla 9. Constante de presión de poro R_u Pared Baja.	104
Tabla 10. Constante de presión de poro R_u otros sectores.	104
Tabla 11. Valores de K_{st}/A_{max} mínimos para análisis seudoestático de taludes*.	107
Tabla 12. Estabilidad de pared baja según magnitud de buzamiento.	108
Tabla 13. Factor de seguridad mínimo y probabilidad de falla máxima para taludes.	109
Tabla 14. Desviación estándar promedio materiales.	110
Tabla 15. Criterios de análisis para la evaluación de la amenaza. ANLA (2015).	112
Tabla 16. Escenarios de análisis.	113
Tabla 17. Factores de seguridad y probabilidad de falla Taludes Escombrera en Pared Baja Mina la Loma. Falla Circular.	121
Tabla 18. Probabilidades de falla recomendadas en taludes mineros. (Read & Stacey, 2009).	122
Tabla 19. Monitoreo de la escombrera (prisma 8).	128
Tabla 20. Monitoreo de la escombrera (prisma 9).	128
Tabla 21. Monitoreo de la escombrera (prisma 10).	129
Tabla 22. Monitoreo de la escombrera (prisma 12).	129

1. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA

La información descrita a continuación fue adquirida gracias a la empresa Drummond Ltd, especialmente del área de comunicaciones.

1.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

En 1935: H.E. Drummond comienza H.E. Drummond Coal Company en Sipsey, Alabama como un proveedor de carbón para granjas y hogares. El señor Drummond hace un préstamo por 300 dólares de Walker County Bank en Jasper, Alabama, usando tres mulas como garantía.

Más tarde, durante la década de los 80, Drummond Company Inc. valoró diferentes alternativas de inversión sobre proyectos carboníferos en diferentes países del mundo, tanto en el mercado del Pacífico como del Atlántico. Finalmente, en 1987, teniendo como base factores como el recurso humano, la geología, la tecnología, el acceso al mercado y la sostenibilidad ambiental, consideró a Colombia como la mejor opción.

Drummond Company Inc. Instituyó la empresa Drummond para el desarrollo de sus proyectos en Colombia y obtuvo, a través de esta sucursal, los derechos para la exploración y explotación de carbón en el departamento del Cesar, particularmente en el área comprendida entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná. A esta zona la denominó Mina Pribbenow, conocida en la región como Proyecto Carbonífero La Loma.

A comienzos de los 90, la empresa Drummond, realizó los trabajos de exploración, así como estudios socioeconómicos y ambientales en los municipios de influencia, estas investigaciones permitieron conocer los perfiles de la población en edad de trabajar y la situación social y económica de sus habitantes. Posteriormente, se determinaron condiciones del aire, del agua, de la flora y de la fauna de la región, con el fin de protegerlos y/o recuperarlos.

Con operaciones en los departamentos del Cesar y Magdalena, Colombia, Drummond Company tiene como objetivo esencial la exploración, explotación, transporte y exportación de carbón.

En 1995 comenzó la producción y exportación de carbón y desde entonces la presencia de Drummond ha sido importante para la economía regional y nacional.

Con el inicio de la producción, la compañía inicia un proceso de mejoramiento continuo y expansión de las operaciones mineras, férreas y portuarias. En 2009 inició la explotación de un segundo proyecto, El Descanso. La empresa Drummond hoy cuenta con cerca de 2.000 millones de toneladas de reservas en sus proyectos La Loma, El Descanso, Rincón Hondo, Similó y Cerrolargo, los tres últimos en proceso de licenciamiento ambiental.

Más tarde Drummond Company, paralelo al desarrollo minero empezó la exploración y desarrollo de proyectos de gas metano asociado a fuentes no convencionales (carbón y gas de esquisto). La compañía cuenta con dos contratos para el desarrollo de este hidrocarburo, uno en el departamento del Cesar y el otro en La Guajira, en asocio con Ecopetrol.

En 2016, la empresa exportó aproximadamente 32.6 millones de toneladas de carbón a más de 24 países en todo el mundo.

1.2. ASPECTOS ESTRATEGICOS

Según la empresa, “Nuestro compromiso con Colombia es firme. Cada día, en cada proyecto, en cada nivel de Drummond consideramos el impacto que tienen nuestras acciones en nuestros empleados, en nuestras comunidades y en nuestro medio ambiente.

- Nos esforzamos por mejorar la educación, la salud, y el bienestar de nuestros empleados y sus familias.
- Invertimos considerablemente en las iniciativas de la comunidad, trabajamos en estrecha colaboración con el gobierno local, y diseñamos e implementamos programas para el desarrollo y beneficio de nuestras comunidades.
- Trabajamos continuamente para controlar y mitigar los impactos de la minería, el transporte, y el embarque de carbón, a medida que desarrollamos y aplicamos técnicas innovadoras de sostenibilidad.
- El aporte de Drummond al desarrollo económico y social de Colombia y su compromiso con el medio ambiente va más allá del cumplimiento legal:
- Nuestras acciones de sostenibilidad se centran en el control y la mitigación de los impactos de la minería, el transporte y el embarque de carbón en el medio ambiente.

- Maximizamos la recuperación de las reservas de carbón, establecemos condiciones de trabajo seguras y eficientes, y proveemos a nuestros trabajadores y a sus familias las mejores condiciones de vida y una base para el desarrollo personal.
- Tenemos los más altos estándares de excelencia, lo cual se demuestra en todos los aspectos de nuestro negocio, incluyendo las medidas adoptadas para proteger el medio ambiente mediante la firme adopción de prácticas ambientales responsables.

Drummond diseña y ejecuta programas para el desarrollo y beneficio de las comunidades del área de influencia de sus operaciones:

- Maximizando la recuperación de las reservas a un costo competitivo para mantener el dinamismo de las economías locales.
- Esforzándose por crear un progreso continuo y duradero para mejorar la calidad de vida de las comunidades afectadas.
- Estableciendo un diálogo permanente y proactivo con las autoridades para que participen en el logro de los objetivos prioritarios para cada región.
- Diseñando e implementando estrategias de desarrollo sostenido a través de las operaciones, en concordancia con la evolución de los mercados y la tecnología.
- Siempre operando dentro del marco legal y adoptando los más altos estándares de la industria”.

1.3. NUESTRAS POLÍTICAS Y COMPROMISOS

- Política de Seguridad, Salud en el Trabajo y Ambiente
- Código de Conducta
- Política de Conflicto de Intereses
- Política Energética
- Política de Comunicaciones
- Mecanismo para denunciar irregularidades y presentar reclamos
- Política de Conservación del Agua
- Política de Derechos Humanos

- Política de Reasentamiento
- Política de Recursos Humanos
- Política de Selección y Contratación
- Política de Sostenibilidad Ambiental
- Política Salarial

1.4. PROCESO DE PAZ Y POSCONFLICTO

1.4.1. Con Nuestros Empleados

En Drummond consideramos a nuestros empleados como una prioridad. Tenemos la suerte de trabajar con personas leales, laboriosas y comprometidas con la excelencia. Nuestro propósito es brindarle calidad de vida a cada uno de nuestros empleados, incluyendo lo mejor en capacitación, equipos, seguridad y supervisión.

1.4.2. Con la Comunidad

En Drummond siempre hemos participado activamente en el desarrollo social y económico de las comunidades en donde trabajamos. Nuestro compromiso con el desarrollo comunitario incluye proyectos tan diversos como la construcción de escuelas y centros de salud, el financiamiento de centros de capacitación laboral, la oferta de becas universitarias y la construcción de estaciones de bomberos.

1.4.3. Con el Ambiente

Nuestro compromiso con la minería responsable nos ha llevado a desarrollar técnicas ambientales adecuadas a las condiciones colombianas, que otras empresas han imitado. Por ejemplo, nuestros trenes, con más de 130 carros, se tratan con agua para prevenir o mitigar la dispersión de partículas, y a medida que el carbón se carga y se humedece, un rodillo lo compacta.

1.5. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

Se presenta el organigrama de la empresa. Ver en anexo D

2. INFORME DE LA PRÁCTICA

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA DEPENDENCIA EN LA QUE SE REALIZÓ LA PRACTICA

Como practicante de Drummond Ltd mi desempeño fue como auxiliar de ingeniería geotécnica, en el área de ingenierías. Esta dependencia se encuentra organizada jerárquicamente de la siguiente forma.

- Vicepresidente de Operaciones Mineras
- Gerente de Ingeniería y Ambiental
- Director de Planeación minera
- Ingeniero de Planeación de Dragalina
- Ingeniero Líder de minería
- Ingeniero Senior de minería
- Supervisor Senior Topografía
- Líder de Topografía
- Supervisor de topografía
- Ingeniero Geotecnista
- Ingeniero III
- Ingeniero II
- Ingeniero I
- Planeador
- Asistente de Ingeniería

Dentro de mis funciones, se encontraba, el apoyar las labores de ingeniería requeridas desde el componente técnico para los diferentes proyectos geotécnicos, ambientales y de riesgo que adelanta la empresa, todo ello, supervisado por el ingeniero geotecnista.

2.2. INFORME DE GESTIÓN

Durante la realización de la práctica, mi desempeño fue en el cargo de auxiliar de Ingeniería Geotecnica en donde fue posible la participación en diferentes proyectos de análisis de estabilidad de diseños en tierra, análisis de estabilidad y monitoreo de taludes, así como en campañas de instrumentación y monitoreo de extensómetros y piezómetros. A continuación, se describe en forma detallada cada uno de los procesos de los que fui participe.

Tabla 1. Informe de funciones.

INFORME DE FUNCIONES			
FUNCIONES ESPECIFICAS DESARROLLADAS	TIEMPO DE EJECUCIÓN	RECURSOS EMPLEADOS	IMPACTOS/RESULTADOS OBTENIDOS
Apoyo en la Realización de Análisis de monitoreos geotécnicos, estructurales y topográficos	6 meses	Personal de Topografía Prismas Estación total Gps GR3 Computador Transporte	El monitoreo de Extensómetros debe realizarse periódicamente, especialmente en zonas de laderas inestables donde se esté adelantando alguna obra de estabilización. El monitoreo de Prismas es de suma importancia para alertar y prevenir deslizamientos.
Instrumentación hidrogeológica y geotécnica	6 meses	Personal de Topografía Estación total Gps GR3 Computador Transporte Piezómetros	El monitoreo de piezómetros es importante para llevar el control del nivel freático en la zona, es necesario como parámetro importante en el diseño de obras Geotécnicas y de drenaje.
Apoyo en la Realización de Análisis de Diseños (Rampas, Botaderos, Pond, Vías, etc)	6 meses	Personal de Topografía Estación total Gps GR3 Computador Transporte	El análisis de estabilidad es importante debido a que nos indica las condiciones de estabilidad en las que se encuentra la estructura analizada, si es posible llevarla a ejecución o de lo contrario recomendar un rediseño.

2.3. LOGROS ALCANZADOS

- El trabajo en equipo, indispensable en cualquier desempeño profesional, en donde se compartieron los conocimientos, habilidades y destrezas aprendidas en la carrera y así tener una visión real del trabajo profesional.

- La adquisición de nuevos conocimientos en el área de geotecnia, e implementación de nuevas herramientas de trabajo, con el análisis de estabilidad a nivel profesional
- Liderazgo, a través de manejo de personal de trabajo, enfocados en el monitoreo y topografía geotécnica.
- Manejo de relaciones interpersonales con nuevas personas, en el área de planeamiento minero.
- Práctica del concepto de ética y moral que me hizo crecer más como persona.

2.4. IMPACTOS PERCIBIDOS POR EL ESTUDIANTE.

Esta experiencia como practicante en el área de geotecnia me permitió fortalecer y desarrollar conocimientos y competencias a través de la aproximación de un contexto real de trabajo, con la aplicación de la geotecnia en minería a cielo abierto.

Fue muy gratificante el poder desempeñar un rol que me permitió el desenvolverse de manera integral, asumiendo responsabilidades y compromisos que me ayudaron a crecer a nivel personal y profesional, con la puesta en práctica de los principios y valores de ética y moral inculcados a lo largo de mi formación como ingeniero, aplicando los conocimientos adquiridos durante esta etapa y logrando así llevarlos a la práctica con un pensamiento crítico y reflexivo, con suficiente liderazgo para lograr enfrentar los retos que me presentó la empresa en el transcurso de la práctica.

3. INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto, basa sus diseños teniendo en cuenta la forma en que se presenta el yacimiento, por esta razón, muchas de estas alcanzan alturas de excavación superiores a los 200 m, justificadas por la necesidad de obtener el mayor beneficio económico a través de la extracción del mineral de interés, en este caso, de carbón, dando como resultado taludes muy elevados y escarpados a lo largo de la pared alta y con inclinaciones menores sobre la pared baja, que es el área sobre la cual se desarrolla la extracción, debido a la poca inclinación del yacimiento.

La mina Drummond Ltd no es la excepción, alcanzando una profundidad máxima de 290 m con un ángulo final del talud igual a 7° en pared baja en donde se debe tener en cuenta la geometría del talud final que no es gobernada únicamente por las características económicas y de producción, sino también por la estabilidad del macizo rocoso, todo dependiendo de la forma del yacimiento mineral y el método de explotación elegido que definen minas a cielo abierto de formas irregulares y taludes de gran altura con curvaturas cóncavas y convexas.

Por otra parte, dentro de una explotación minera, le sumamos el manejo de las escombreras, que presentan comúnmente tipos de rotura circular, compuestas y por vuelco de bloques en rocas. Las roturas planas son menos frecuentes debido a que el tipo de material analizado tiene un comportamiento similar al suelo. En superficies de rotura curvas o circulares, la profundidad máxima alcanzada dentro de la escombrera depende de la cohesión, del ángulo de fricción, ángulo del talud y del nivel de tensiones normales a lo largo de la superficie, como también de la carga sísmica producto de las voladuras. A medida que la profundidad aumenta, también existe un incremento de las tensiones normales, sujetos a grandes deformaciones, lo que conlleva a una plastificación del material originando las condiciones para la ocurrencia de una rotura global o generalizada.

Algunas metodologías vienen siendo empleadas para la evaluación de la estabilidad y el comportamiento de taludes, tanto de explotaciones mineras como de escombreras, entre ellos: métodos de clasificación de macizos rocosos, métodos de equilibrio límite, métodos numéricos, análisis probabilísticos e instrumentación geotécnica (monitoreo).

Los deslizamientos de taludes se presentan con frecuencia en minería a cielo abierto, y en su mayoría, las empresas, continúan operando de manera segura, a pesar de que sus frentes de explotación estén en movimiento, para ello apoya en el constante monitoreo, que permite el advertir de manera oportuna las condiciones de estabilidad, para evitar el deterioro y fallamiento del mismo. Dentro de un desarrollo minero, es más común la inestabilidad y fallamiento de las escombreras debido al material que la conforman, por su poca cohesión, ya que sus componentes son materiales sueltos con un comportamiento similar a un suelo.

Los taludes, sin importar si se trata de un frente de explotación o de una escombrera, están diseñados con un factor de seguridad que permite controlar el riesgo de lesiones y daños al equipo debido al posible fallamiento en los mismos. Las propiedades de la masa rocosa, suelos, litología, las estructuras geológicas, y las condiciones hidrológicas son elementos importantes para el diseño de taludes seguros y eficientes. Las diferentes presentaciones del agua sobre el terreno, subterránea, superficial y de escorrentía se pueden controlar para reducir sus efectos nocivos sobre la estabilidad de un terreno. Otro mecanismo de control son los bancos y las bermas, utilizados para disminuir la velocidad y volumen del deslizamiento. Sin embargo, un talud cuidadosamente diseñado y construido puede fallar debido a estructuras geológicas, condiciones climáticas inesperadas o actividades sísmicas en el caso de las voladuras. Por estas razones, es importante realizar evaluaciones regularmente y monitoreo sistemático de los taludes para la detección temprana de fallas y el peligro asociado.

Un talud en escombrera nunca falla espontáneamente. Antes de que suceda, proporciona información acerca del potencial movimiento que lo hace medible como la presencia de grietas de tensión. El deslizamiento de tierra es el resultado del movimiento a largo plazo de los taludes que se mueven durante un determinado tiempo, producto de un movimiento acumulativo que es posible estudiar, analizar por el tiempo transcurrido desde sus primeras evidencias. Tal movimiento puede producirse durante un corto período de tiempo como resultado de eventos importantes como la sismicidad producto de las voladuras. En las condiciones más bajas, el monitoreo de la estabilidad de taludes y los deslizamientos de tierra implican la

selección de ciertos parámetros y la observación de su comportamiento con respecto al tiempo. Los dos parámetros más importantes son el desplazamiento y los niveles de agua subterránea.

El desplazamiento del talud se puede caracterizar, en términos de profundidad de plano de falla, dirección, magnitud y velocidad, usando la monitorización convencional de la pendiente. Además, se pueden utilizar los piezómetros para determinar los niveles de agua. Por otra parte, es indispensable, a través de la topografía medir los movimientos de superficie fija con el apoyo de los extensómetros. Los inclinómetros capturan los cambios en la dirección, la velocidad de movimiento de la pendiente y la extensión de la masa de falla.

Para llevar a cabo el análisis del área de estudio, se hará uso de dos métodos muy importantes como lo son el método de equilibrio límite e instrumentación Geotécnica (monitoreo).

4. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

4.1. ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD Y MONITOREO DE UNA ESCOMBRERA DE LA ZONA SUR MINA PRIBBENOW

4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En toda actividad minera, en especial a cielo abierto, es necesario realizar remociones de material estéril, que implica la búsqueda de un lugar donde depositarlo (botadero o escombrera), la selección de este sitio se hace de manera que no afecte ni retrase la explotación del carbón, velando además por la seguridad del personal. En la mina Pribbenow, se adelantan explotaciones de carbón a cielo abierto donde en la zona sur destinada para escombreras en gran parte. Allí, se han venido presentando deslizamientos de material no consolidado, como consecuencia de una capa de arcilla que subyace el piso del manto de carbón inferior (borrego).

Esta capa origina un plano de debilidad sobre el cual falla el sostenimiento del material depositado, representando un peligro potencial para las labores mineras y a su vez generan pérdidas económicas a la empresa impidiendo la recuperación del manto de carbón de nombre “borrego c” ubicado en la zona concerniente a este estudio. Es por ello que se requiere de un análisis de estabilidad y un monitoreo constante para el correcto funcionamiento de la escombrera.

4.1.2. JUSTIFICACIÓN

Toda obra ingenieril debe ser segura tanto por la seguridad y bienestar del personal que labora, como por el correcto funcionamiento de la obra, entre ellos la actividad minera, por eso, las obras ingenieriles, requieren un estudio de estabilidad para lo que es indispensable un factor de seguridad óptimo y adecuado, por eso se hace necesario el uso de un método confiable y seguro. Para este estudio se adoptó el método de equilibrio límite con el fin de determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla del talud en relleno o escombrera. Este análisis se realiza en las secciones o áreas más críticas representativas de cada parte de la escombrera (peor escenario) considerando además los sistemas de discontinuidades geológicas presentes en el área.

Es por ello que todo talud diseñado deba cumplir el criterio de seguridad establecido y contar con un monitoreo constante para llevar un registro de los posibles movimientos y aceleraciones que ha sufrido durante su vida útil, todo esto es requerido para tomar decisiones y aplicar las medidas necesarias a la hora que se aprecien inestabilidades anomalías en el talud monitoreado.

4.1.3. OBJETIVO GENERAL

Analizar geotécnicamente y monitorear la estabilidad de una escombrera en la zona sur de la mina Pribbenow

4.1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Actualizar las unidades cartográficas geológicas subyacentes locales de la zona sur mina Pribbenow.
- Analizar la topografía del área de estudio con el fin de generar modelos comparativos previos y posteriores a la estabilización.
- Diseñar y construir un modelo tridimensional y bidimensional para el análisis del área para determinar mecanismos de rotura presentes en la escombrera zona sur mina Pribbenow.
- Monitorear con prisma y estación total la escombrera para su correcto control y prevención de deslizamientos.
- Determinar un factor de seguridad óptimo para mantener estable la escombrera.

4.1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Por medio de este proyecto se busca analizar geotécnicamente el área de una escombrera de la zona sur en la mina Pribbenow y determinar las medidas adecuadas de corrección y prevención que permitan su estabilización de acuerdo con un factor de seguridad óptimo según los estándares requeridos para una operación segura, a continuación, se presentan los resultados esperados.

- Obtener información concreta y precisa de la geología local del área de estudio.
- Generar las superficies del área de estudio con el fin de tener una visión del comportamiento anterior y posterior de la zona.
- Adquirir datos concretos del monitoreo con prisma y estación total que reflejen el comportamiento real del área a estudiar con el fin de aportar recomendaciones que ayuden a una operación segura.
- Dar respuesta del estado de la escombrera y en qué condiciones se encuentra de acuerdo con el análisis de estabilidad realizado.

4.1.6. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se describen algunos conceptos básicos y necesarios en materia de mecánica de suelos, rocas y Geotecnia, como también la descripción de acontecimientos ocurridos en el área de estudio, los cuales son necesarios para el desarrollo de este trabajo, toda la información suministrada a continuación fue obtenida del libro Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez y La empresa Drummond Ltd.

4.1.7. MARCO DE ANTECEDENTES.

El relleno en el área de la pared baja en la zona sur de la Mina La Loma, Contrato 144-97 ha presentado una zona de inestabilidad desde el año 2011 debido a la concentración de una capa de lodo plástica que subyace el piso del manto borrego (ver Anexo A-Cortes Geológicos).

Con el fin de lograr la estabilización en esta zona, se han implementado medidas preventivas que han permitido reducir la incidencia de movimiento. Adicionalmente, esta área es monitoreada permanentemente con instrumentación de prismas y estación total.

La destrucción de la arcilla plástica mediante voladuras controladas (voladuras de rugosidad) ha probado ser un método muy eficiente para estabilizar el área. Dichas voladuras se realizan siguiendo los protocolos de seguridad retirando todo el personal y los equipos del área, monitoreando una hora antes, inmediatamente después y a una hora de realizada la voladura. Si el monitoreo muestra una variación significativa

en la velocidad y desplazamiento, se cierra el área hasta que esta estabilice para poder continuar con los trabajos de recuperación del relleno.

Fotografía 1. Localización del área del deslizamiento



Fuente: Drummond Ltd

4.1.7.1. DESCRIPCIÓN DEL DESLIZAMIENTO

El día 24 de septiembre de 2017 se realiza la voladura de rugosidad en el área de la escombrera con una longitud de 520 metros, una hora antes, el monitoreo muestra un movimiento muy pequeño, pero inmediatamente transcurrido un tiempo se refleja una aceleración del movimiento (ver tabla 1 y Figuras 2 a 8) que registró un deslizamiento que afectó una vía secundaria de acarreo (Rampa Panamericana) que cruzaba el relleno, de inmediato se da la alerta y se cierra el área hasta que el monitoreo muestre y refleje una disminución en el movimiento, posteriormente se procede con el plan correctivo de estabilización.

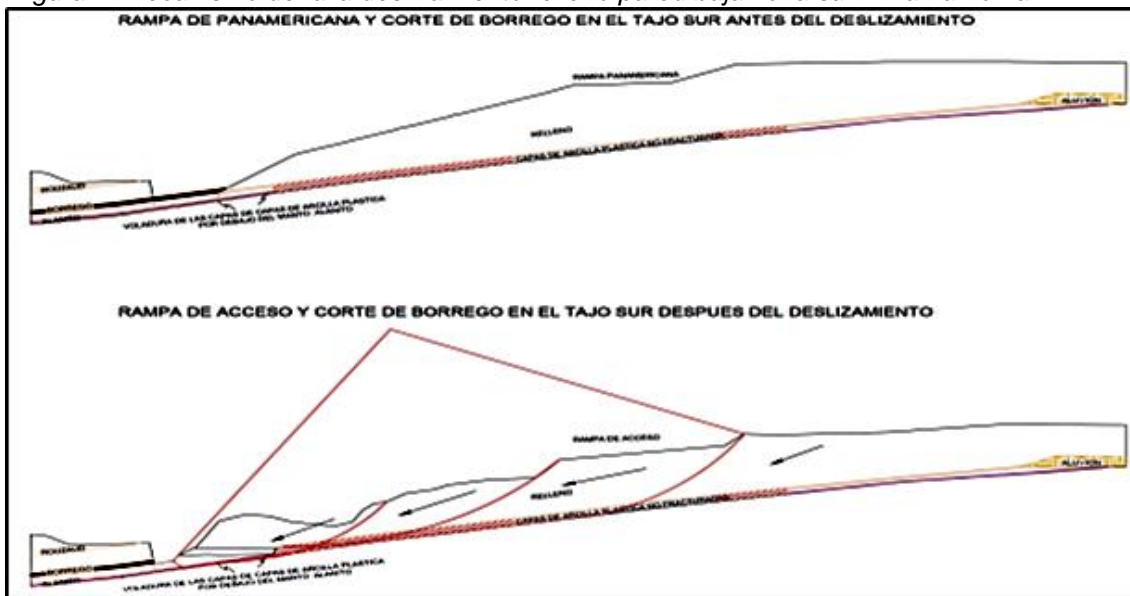
Tabla 2. Monitoreo Relleno Pared Baja Sector Sur Mina La Loma.

PRISMA	DATE	D acumulado (cm)	velo (cm/dia)		PRISMA	DATE	D acumulado (cm)	velo (cm/dia)
PA8	9/2/17 9:53 AM				PA9	9/2/17 9:55 AM		
	9/23/17 2:50 PM	79.89	1.89			9/23/17 2:58 PM	10.88	1.36
	9/24/17 12:20 AM	78.00	5.15			9/24/17 12:25 AM	11.43	3.14
	9/24/17 1:16 PM	164.43	160.47			9/24/17 1:24 PM	15.34	24.35
	9/24/17 2:05 PM	531.01	10,775.14			9/24/17 2:07 PM	22.11	229.86
	9/24/17 2:40 PM	841.71	12,791.27			9/24/17 2:45 PM	31.02	351.22
	9/24/17 3:45 PM	1,210.12	8,163.05			9/24/17 3:47 PM	60.03	785.05
	9/24/17 4:20 PM	1,374.80	6,781.93			9/24/17 4:23 PM	101.52	1,749.76
	9/24/17 4:50 PM	1,516.11	6,784.41			9/24/17 4:54 PM	166.30	3,051.37
	9/24/17 5:25 PM	1,635.72	4,924.84			9/24/17 5:28 PM	241.10	3,183.01
	9/25/17 6:56 AM	8,082.77	11,471.94			9/25/17 7:00 AM	6,899.91	11,818.02
	9/25/17 7:48 AM	8,339.36	7,158.77			9/25/17 7:50 AM	7,036.59	3,939.14
	9/25/17 9:54 AM	8,391.88	605.70			9/25/17 9:57 AM	7,172.72	1,543.96
	9/25/17 10:50 AM	8,396.62	127.38			9/25/17 10:56 AM	7,176.99	105.12
	9/25/17 11:49 AM	8,397.38	44.54			9/25/17 11:50 AM	7,176.38	115.65
	9/25/17 12:47 PM	8,397.67	11.65			9/25/17 12:50 PM	7,178.45	155.49
	9/25/17 1:58 PM	8,397.23	55.02			9/25/17 2:04 PM	7,177.95	46.85
	9/25/17 2:49 PM	8,399.14	152.04			9/25/17 2:53 PM	7,178.25	45.32
	9/25/17 3:56 PM	8,397.90	70.11			9/25/17 3:59 PM	7,178.60	30.86
	9/25/17 4:45 PM	8,398.18	21.99			9/25/17 4:49 PM	7,178.61	37.31
	9/26/17 7:17 AM	8,397.62	2.50			9/26/17 7:23 AM	7,177.24	3.58
	9/27/17 7:10 AM	8,397.94	1.38			9/27/17 7:13 AM	7,177.93	2.58
	9/28/17 7:14 AM	8,396.91	2.05			9/28/17 7:18 AM	7,176.49	1.65
	9/28/17 2:59 PM	8,397.46	2.21			9/28/17 3:05 PM	7,174.92	5.12
	9/29/17 7:02 AM	8,396.57	3.34			9/29/17 7:06 AM	7,174.68	1.22
	9/30/17 6:50 AM	8,395.33	1.40			9/30/17 6:52 AM	7,174.45	1.02

Fuente: Autor

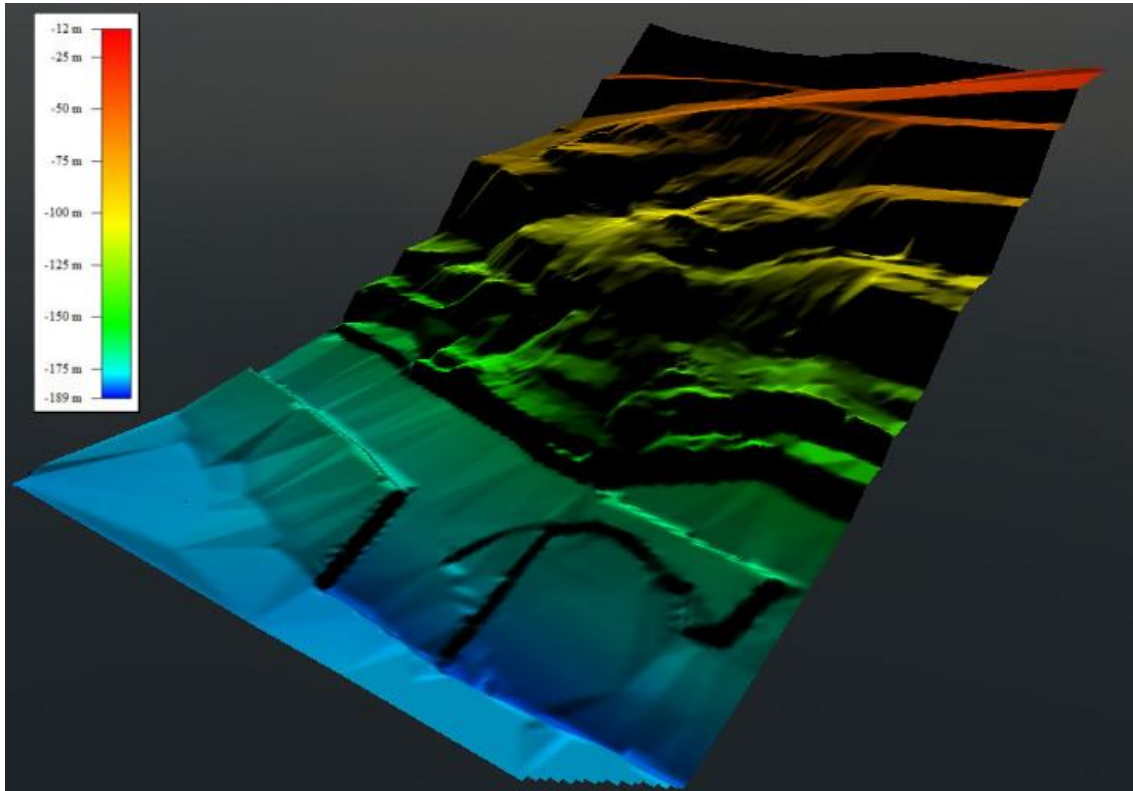
En amarillo se destaca el movimiento crítico, en rojo el tiempo que se demoró en estabilizarse nuevamente el área.

Figura 1. Mecanismo de falla deslizamiento relleno pared baja zona sur Mina La Loma.



Fuente: Autor

Figura 2. Modelo tridimensional del deslizamiento



Fuente: Autor

Fotografía 2. Rampa panamericana antes del deslizamiento.



Fuente: Drummond Ltd

Fotografía 3. Escombrera Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 1.



Fuente: Drummond Ltd



Fotografía 4. Escombrera Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 2.

Fotografía 5. Relleno Zona sur Mina La Loma después del Deslizamiento. Vista 3.



Fuente: Drummond Ltd

4.1.7.2. MEDIDAS CORRECTIVAS RELLENO PARED BAJA ZONA SUR MINA LA LOMA:

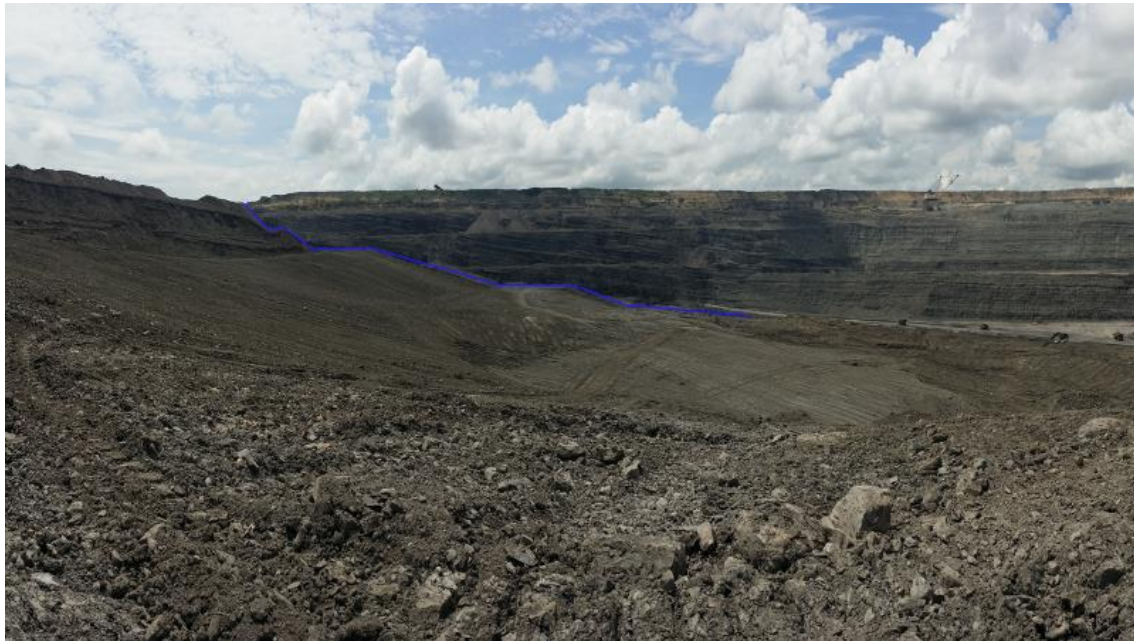
Con el fin de lograr la estabilidad permanente de este sector, se han implementado medidas adicionales a las de la voladura de rugosidad (destrucción de la arcilla plástica que subyace el piso del manto Alanito), el monitoreo continuo antes, durante y después de las voladuras cercanas a la pata del relleno, y el retiro de equipos y personal hasta que el monitoreo determine que la zona es estable; estas medidas adicionales son:

1. Voladuras de drenaje y rugosidad de las arcillas plásticas que subyacen el piso de Alanito, de longitudes no mayores a 100 metros.
2. Mantener el tratamiento con voladura de drenaje y rugosidad en el piso del manto Borrego (Por debajo del piso del manto Alanito), incluso si el área es cubierta por parte del deslizamiento, esta zona se perforaría sobre el relleno deslizado.
3. Inspección geotécnica continua, orientada al levantamiento de aspectos geotécnicos como deformaciones de la cara del talud, grietas y afloramientos de agua no deseados.

4. Sellamiento de grietas y perfilado del talud en las áreas que presenten estas características de inestabilidad.
5. Compactación por medio de bancos de máximo 10 metros de altura en las zonas de material suelto por el deslizamiento.

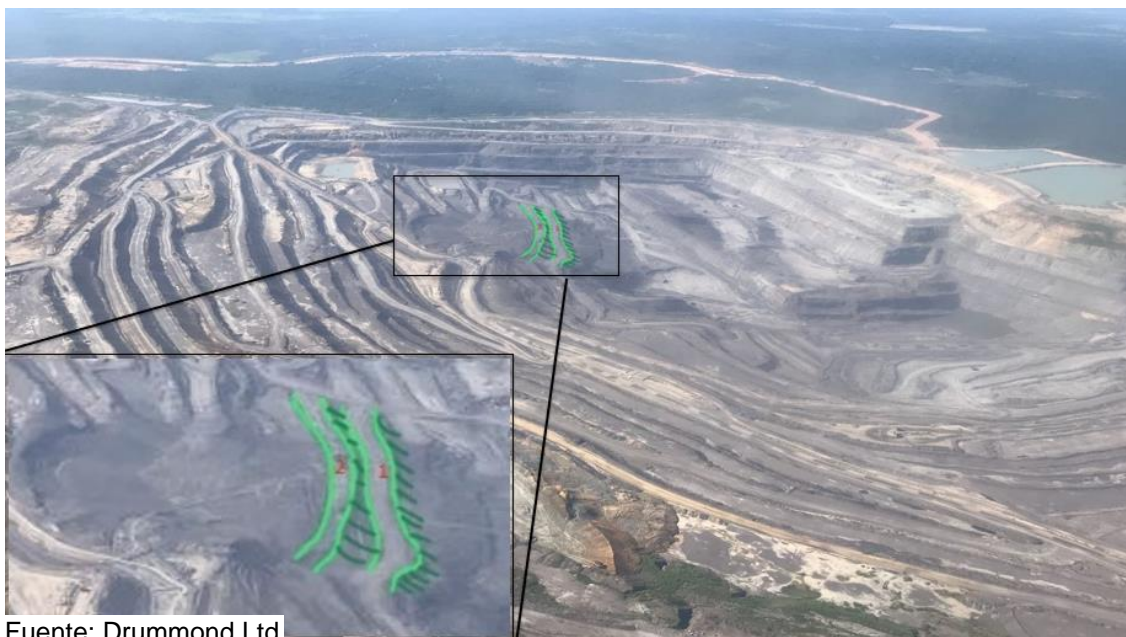
A continuación, se puede apreciar estas medidas que se están llevando a cabo y han favorecido la estabilidad del área.

Fotografía 6. Perfilado después del deslizamiento.



Fuente: Drummond Ltd

Fotografía 7. Bancos de estabilización zona del deslizamiento.



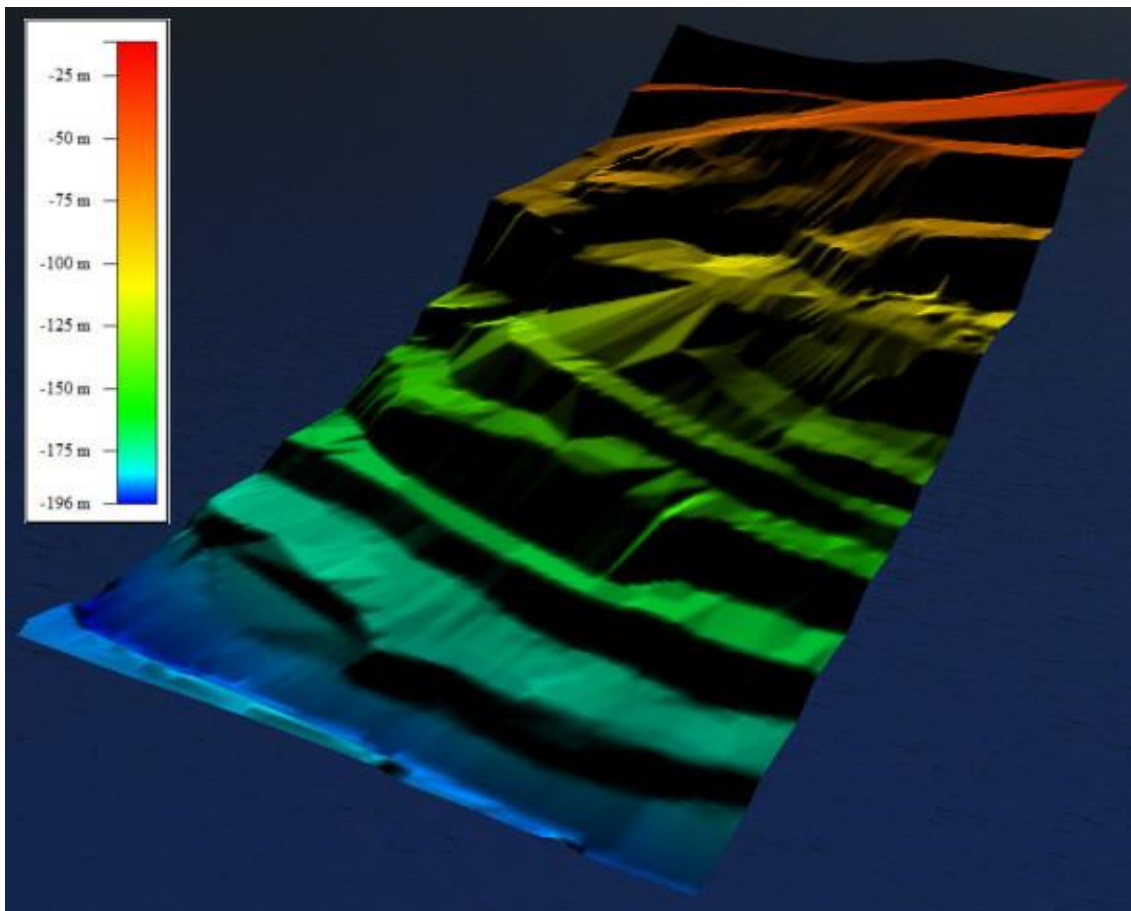
Fuente: Drummond Ltd

Fotografía 8. Banqueo y perfilado terminado. zona después del deslizamiento.



Fuente: Drummond Ltd

Figura 3. Modelo Tridimensional del área estabilizada



Fuente: Autor

4.1.8. MARCO TEÓRICO

4.1.8.1. NOMENCLATURA

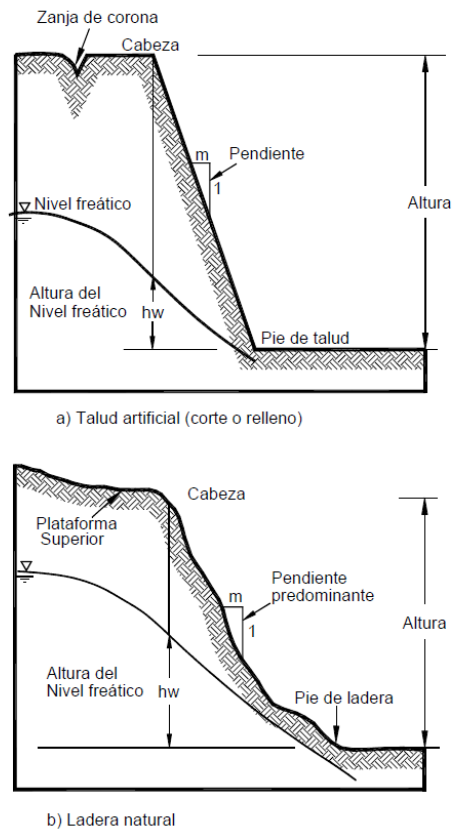
En el presente capítulo, se establece la nomenclatura básica que se recomienda sea utilizada para el estudio de los taludes y los deslizamientos de tierra y se define la clasificación de los diferentes tipos de movimientos, desde el punto de vista geotécnico.

La nomenclatura más comúnmente utilizada en las ciencias Geotécnicas, se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el “Special Report 247” del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema de nomenclatura y clasificación más utilizado en el mundo. A esta clasificación se le agregaron a algunos elementos nuevos e importantes, aunque en términos generales, se mantuvieron los principios básicos de la clasificación del TRB, complementándolos con otros términos, los cuales no se encontraban en la terminología original del TRB. Por otra parte, en cada país o región se utilizan algunos vocablos propios. Los términos básicos más aceptados universalmente son el de “talud” para identificar una superficie con relieve inclinado y el de “deslizamiento” para los movimientos del talud. (Jaime Suarez. Libro Deslizamientos).

4.1.8.2. CONCEPTOS BÁSICOS

Talud. Un “talud” o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente (Figura 4). Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

Figura 4. Nomenclatura de taludes y laderas

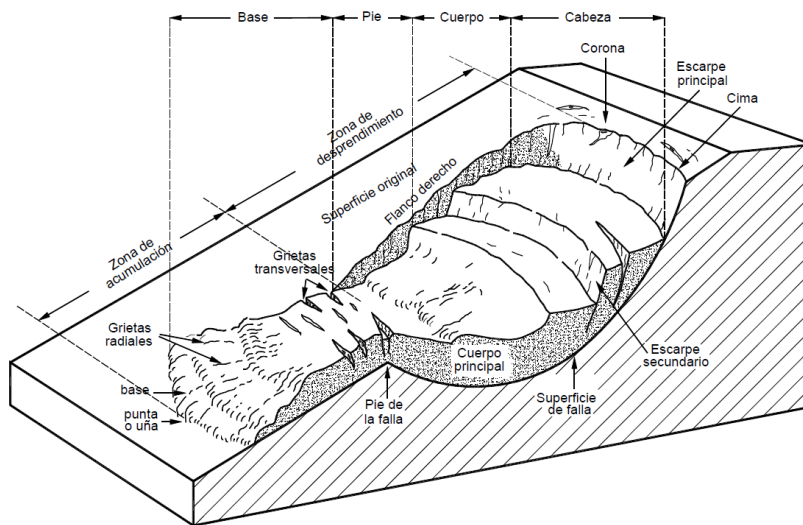


Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.2.1. Partes de un Talud

El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semi-recta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de depositación (Figura 5).

Figura 5. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Pie, pata o base. El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.

Cabeza, cresta, cima o escarpe. Se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semi-vertical o de alta pendiente, se le denomina “escarpe”. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.

Altura. Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.

Altura de nivel freático. Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.

Pendiente. Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación H/V. Siendo H, distancia horizontal y V, distancia vertical.

4.1.8.2.2. Deslizamiento

Los deslizamientos (“Landslides”) consisten en “movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud” (Cruden 1991). En el término “deslizamiento” se incluyen tanto los procesos de erosión como los procesos denudacionales. La naturaleza precisa del proceso no está incluida en la definición e incluye procesos que son producto de la acción de las fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc. En el presente texto no se utiliza la denominación “Fenómeno de remoción en masa” (Mass Wasting), por considerarlo poco universal. Sin embargo, en Colombia, este término es utilizado regularmente. Algunos países utilizan otros nombres autóctonos como “deslaves”.

Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera, pueden moverse hacia abajo mientras otros se mueven hacia arriba. Los fenómenos de inestabilidad incluyen, generalmente, una combinación de procesos erosionales y denudacionales interrelacionados entre sí y a menudo mezclados.

4.1.8.2.3. Partes de un Deslizamiento

En la figura 5 se muestra un deslizamiento típico o desplazamiento en masa.

Cabeza. Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

Cima. El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Corona. El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

Escarpe principal. Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.

Escarpe secundario. Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

Superficie de falla. Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla.

Pie de la superficie de falla. La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Base. El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

Punta o uña. El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

Cuerpo principal del deslizamiento. El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

Superficie original del terreno. La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

Costado o flanco. Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

Derecha e izquierda. Para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (Norte, Sur, Este, Oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

4.1.8.2.4. Dimensiones de los movimientos

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 6):

Ancho de la masa desplazada W_d . Ancho máximo de la masa desplazada, perpendicular a la longitud L_d .

Ancho de la superficie de falla W_r . Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicular a la longitud L_r .

Longitud de la masa deslizada L_d . Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

Longitud de la superficie de falla L_r . Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

Profundidad de la masa desplazada D_d . Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .

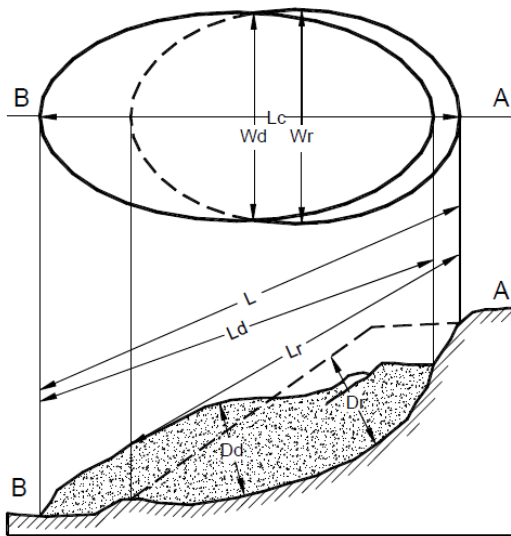
Profundidad de la superficie de falla D_r . Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .

Longitud total L . Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

Longitud de la línea central L_c . Distancia que hay desde la punta (o uña) hasta la corona del deslizamiento, a lo largo de los puntos ubicados sobre la superficie original y equidistantes de los bordes laterales o flancos.

Igualmente, se deben medir alturas del nivel freático, alturas de los escarpes, radios de rotación del movimiento, pendientes de la superficie antes y después de la falla. En los deslizamientos la escala horizontal debe ser igual a la vertical. Se recomienda que las dimensiones sean identificadas en planos en planta y perfil del deslizamiento.

Figura 6. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo con IAEG Commission on Landslides (1990).

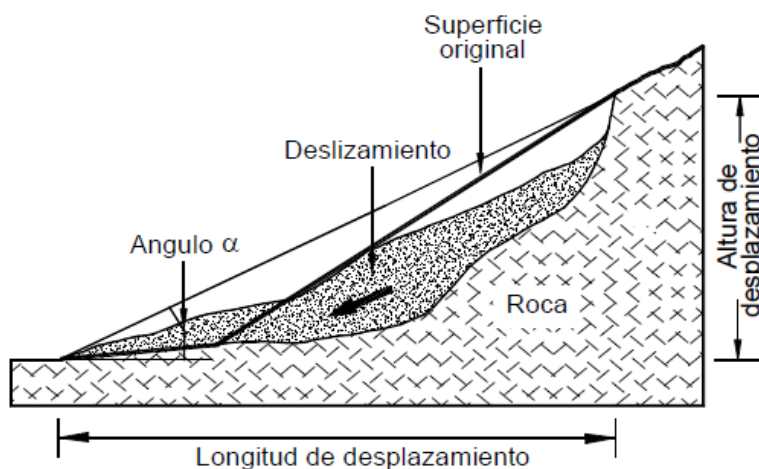


Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.2.5. Ángulo de Desplazamiento

El ángulo de desplazamiento α determina el volumen de material de un flujo y su velocidad (Figura 7). A menor α , el volumen total puede ser mayor, pero la velocidad del movimiento tiende a ser menor. Sin embargo, la velocidad también depende de la pendiente de la zona de desprendimiento y la longitud del recorrido.

Figura 7. Ángulo de desplazamiento (α).

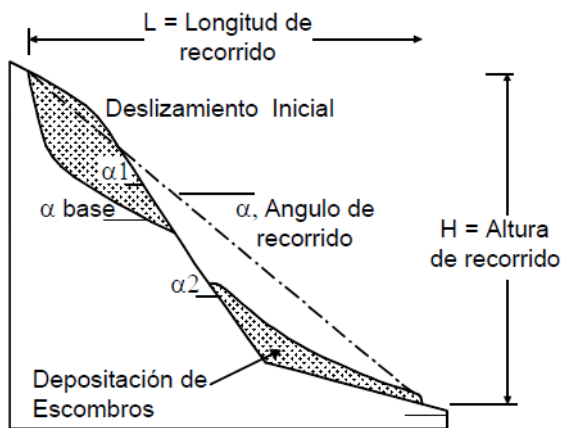


Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.2.6. Ángulo y longitud de recorrido

En los movimientos de flujo, especialmente en los flujos rápidos, el ángulo y la longitud de recorrido, pueden determinar la magnitud del riesgo. El ángulo de desplazamiento inicial determina las condiciones al inicio del movimiento y el ángulo de recorrido (figura 8) afecta el proceso del flujo hasta que se detiene o alcanza su longitud total de recorrido. Esta longitud depende del ángulo de inclinación y geometría del talud, del tipo de material, del contenido de agua, del volumen del deslizamiento y del confinamiento del canal de flujo, entre otros factores. Por ejemplo, a mayor volumen del deslizamiento, mayor es la longitud de recorrido (Figura 9).

Figura 8. Longitud y ángulo de recorrido. (Hunter y Fell, 2003).



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

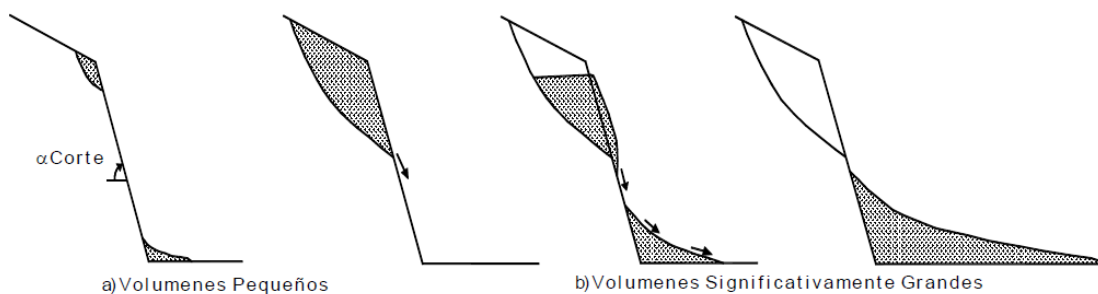


Figura 9. Efecto del volumen del deslizamiento en la longitud de recorrido. (Hunter y Fell, 2003).

Hunter y Fell (2003) indican algunas de las condiciones que influyen en la longitud de recorrido:

- La distancia de recorrido es significativamente mayor, cuando el canal de flujo es confinado.
- Los deslizamientos de menor volumen (menos de 500 m³), con canales de flujo no confinados, depositan los materiales a lo largo de la totalidad del recorrido independientemente del ángulo de desplazamiento. Si el ángulo de inclinación del canal de flujo es menor de 15°, la longitud de recorrido es relativamente corta.

4.1.8.2.7. Deslizamientos en Masa (Traslacionales y Rotacionales)

El deslizamiento en masa consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.

El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la que sería la superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual. La superficie de falla es una zona de determinado espesor, en la cual se producen cambios volumétricos y desplazamientos relacionados con la falla o rotura, al cortante de los materiales.

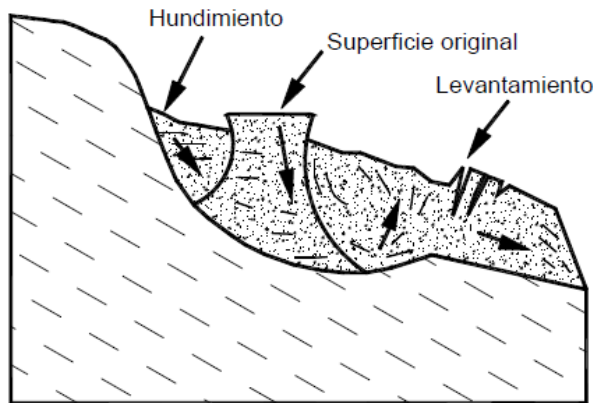
Los desplazamientos en masa se pueden subdividir en subtipos denominados deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación y traslación. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y el tipo de estabilización que se va a emplear.

Deslizamiento Rotacional. En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento.

El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual

genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento (Figura 10).

Figura 10. Deslizamiento rotacional típico.



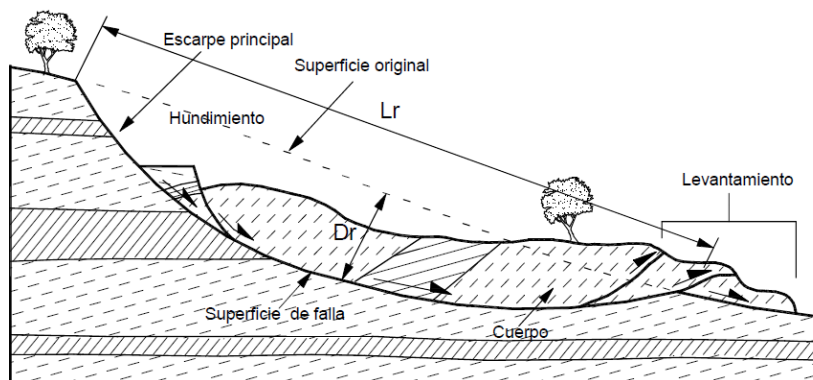
a) Movimiento de las masas de tierra

Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Curvatura de la superficie de falla. Los deslizamientos estrictamente rotacionales (círculos de falla) ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y debido a su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura.

En la mayoría de los desplazamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de “cuchara” (Figura 11). Los desplazamientos rotacionales generalmente tienen una relación D_r/L_r entre 0.15 y 0.33 (Skempton y Hutchinson, 1969).

Figura 11. Desplazamiento de rotación en una ladera.



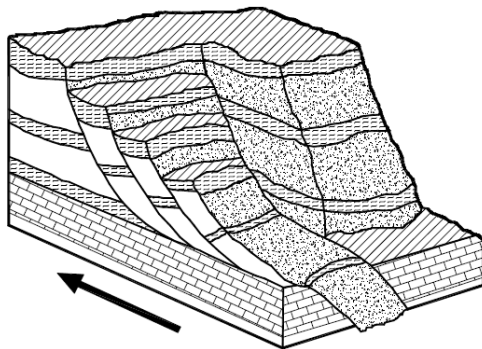
Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento aparentemente es semi-vertical y tiene muy poca rotación. No obstante, se puede observar que la superficie original del terreno gira en la dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

La formación de los escarpes semi-verticales en los deslizamientos de rotación facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos o progresivos hacia arriba.

Dentro del deslizamiento ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente, ocurren varios desplazamientos sucesivos en su origen pero que conforman una zona de desplazamientos rotacionales independientes (Figura 12). Los casos más conocidos de deslizamientos de rotación, se presentan en suelos arcillosos blandos con perfil profundo, escombreras y en suelos residuales con perfiles meteorizados de gran espesor.

Figura 12. Deslizamientos sucesivos dentro de un movimiento general de rotación.

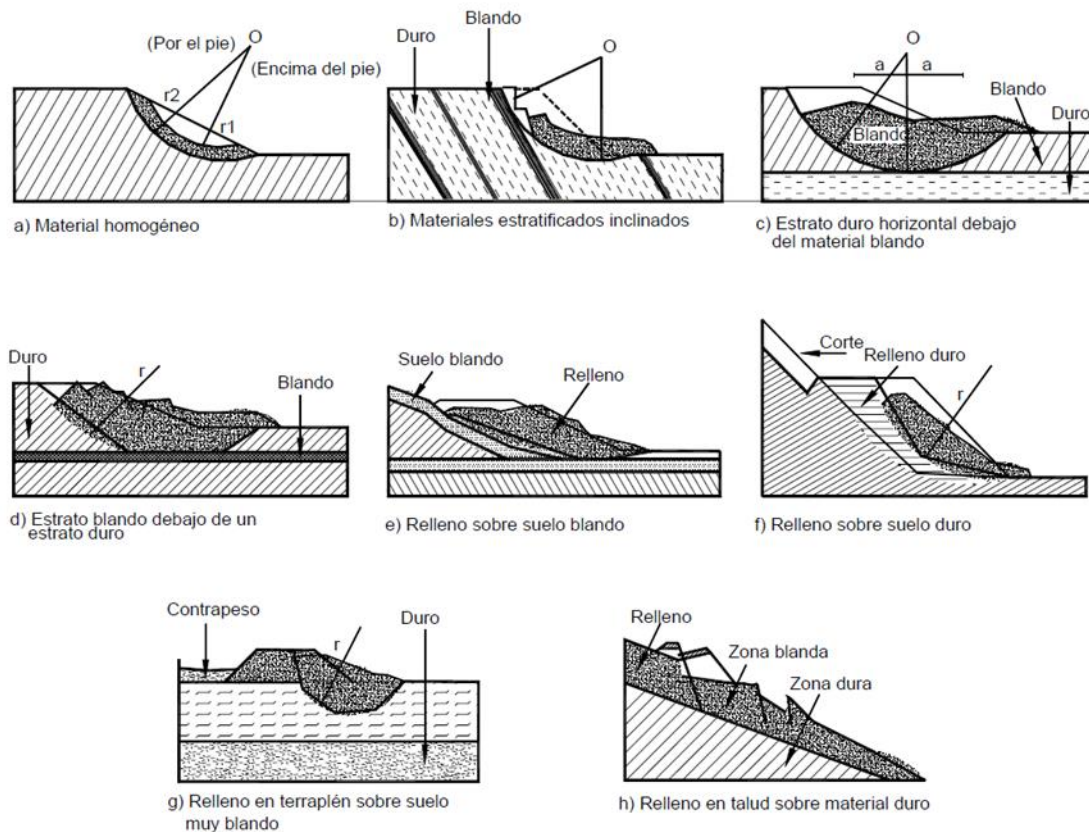


Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

También se presentan con frecuencia en los terraplenes. Generalmente, la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades y juntas o planos de estratificación.

El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad. Las superficies de falla pueden ser tangentes o secantes a esas zonas de debilidad (Figura 13).

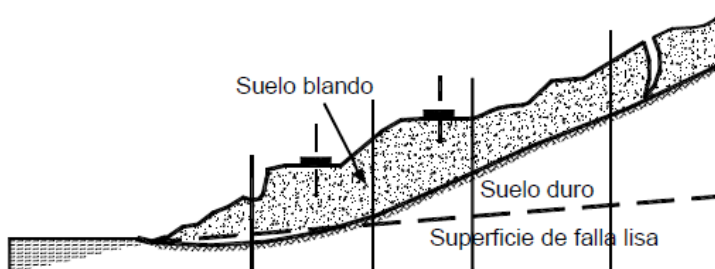
Figura 13. Efectos de la estructura en la formación de los desplazamientos a rotación.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Deslizamiento de Traslación. En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo (Figura 14). Los movimientos traslacionales generalmente, tienen una relación D_r/L_r de menos de 0.1. En muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte.

Figura 14. Deslizamiento de traslación



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.2.8. Deslizamientos Compuestos de Traslación y Rotación.

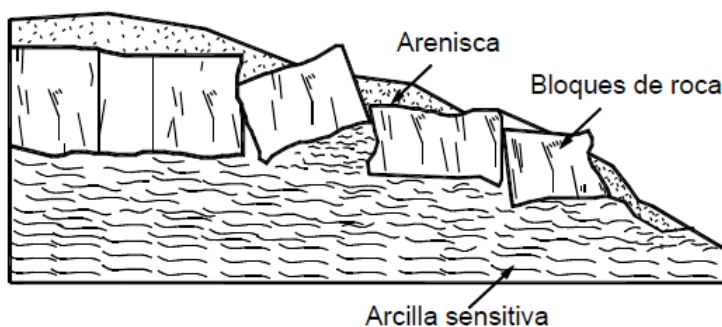
Con frecuencia se presentan movimientos que incluyen dentro del patrón de desplazamiento general, movimientos de traslación y de rotación. A estos movimientos se les conoce como “compuestos”. Igualmente se pueden presentar hundimientos o extensiones laterales en forma conjunta.

La mayoría de los movimientos incluyen varios tipos de desplazamiento, aunque sólo predomina uno.

Extensión Lateral. Se denomina extensión o esparcimiento lateral a los movimientos con componentes, principalmente laterales, en taludes de baja pendiente. En los esparcimientos laterales el modo del movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión (sobre roca o sobre suelos plásticos).

Las extensiones laterales ocurren comúnmente en las masas de roca, sobre suelos plásticos o finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse. El mecanismo de falla de una extensión lateral puede incluir, además, elementos de rotación, traslación, o de flujo sobre materiales plásticos (Figura 15).

Figura 15. Esquema de una extensión lateral.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS

Junto al tipo de movimiento, es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, estilo, velocidad, humedad y material.

4.1.8.3.1. Tipo de Material

Los siguientes términos han sido adoptados como descripción de los materiales que componen un determinado movimiento del talud.

Roca. Se denomina “Roca” al material duro y firme que estaba intacto en su lugar, antes de la iniciación del movimiento.

Residuos. Se denomina Residuos o “Detritos”, al suelo que contiene una significativa proporción de material grueso. Se considera que, si más del 20% del material en peso es mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente, debe llamarse “Residuos”. Por lo general, existen partículas mucho mayores de 2 milímetros, para que sean consideradas de este modo.

Tierra. Se denomina tierra, a los materiales con más del 50% de finos (Pasantes tamiz ASTM 200) (USGS, 2004), su humedad es relativamente baja y no tiene consistencia líquida; se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas.

Lodo. Se denomina lodo a un material con más del 50% de finos (Pasantes tamiz ASTM 200) (USGS, 2004), con humedades cercanas o superiores al límite líquido, esto le permite fluir rápidamente.

4.1.8.3.2. Humedad

Se proponen cuatro términos para definir las condiciones de humedad así:

Seco. No contiene humedad “visible”.

Húmedo. Contiene algo de agua, pero no posee agua (corriente) libre y puede comportarse como un sólido plástico, pero no como un líquido.

Mojado. Contiene suficiente agua para comportarse en parte, como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material.

Muy mojado. Contiene agua suficiente para fluir como líquido, aún en pendientes bajas.

4.1.8.3.3. Estilo

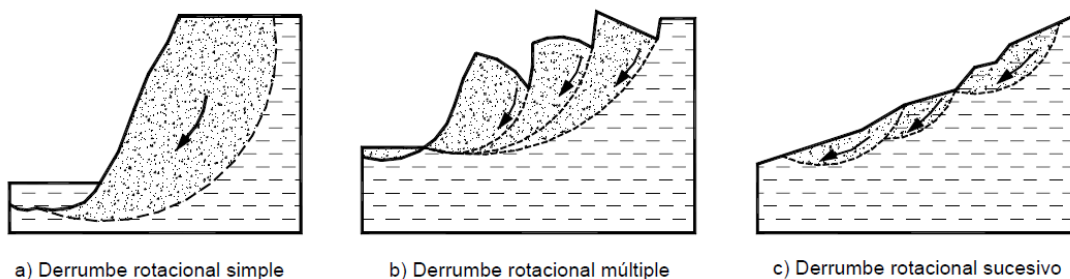
Varnes estableció una nomenclatura de actividad de deslizamiento cuando aparecen conjuntamente diferentes tipos de movimientos:

Complejo. Un deslizamiento complejo es aquel que tiene al menos, dos tipos de movimiento. Por ejemplo, inclinación y desplazamiento.

Compuesto. El término compuesto corresponde al caso en el cual ocurren simultáneamente varios tipos de movimientos en diferentes áreas de la masa desplazada.

Múltiple. Se denomina múltiple a un deslizamiento que muestra movimientos repetidos del mismo tipo, generalmente, ampliando la superficie de falla. (Figura 16). En cambio, un movimiento sucesivo corresponde a movimientos repetidos, pero que no comparten la misma superficie de falla.

Figura 16. Desplazamientos rotacionales simples y múltiples.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Sencillo. Se presenta un solo tipo de movimiento.

4.1.8.3.4. Estado de Actividad

De acuerdo con su estado actual de actividad, los deslizamientos se clasifican de la siguiente forma. (figura 17)

Activo. Deslizamiento que se está moviendo en los actuales momentos.

Reactivado. Movimiento que nuevamente está activo, después de haber estado inactivo. Por ejemplo, deslizamientos reactivados sobre antiguas superficies de falla.

Suspendido. Deslizamientos que han estado activos durante los últimos ciclos estacionales, pero que no se están moviendo en la actualidad.

Inactivo. Deslizamiento que lleva varios ciclos estacionales, sin actividad.

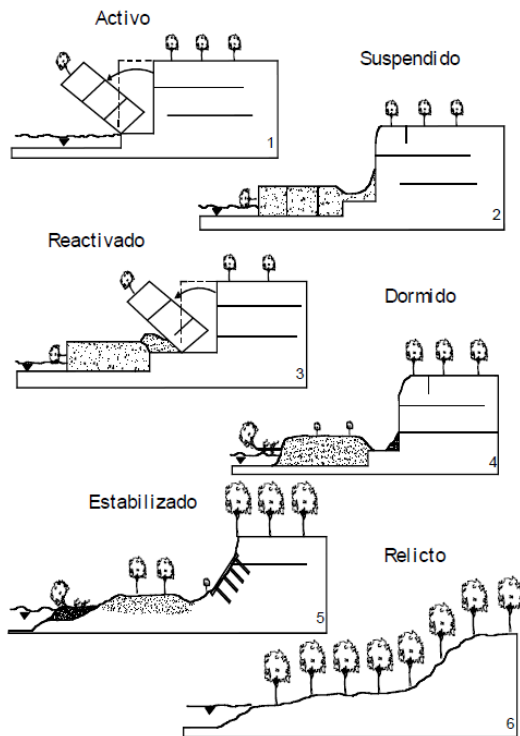
Dormido. Deslizamiento inactivo donde aparentemente permanecen las causas del movimiento.

Abandonado. Es el caso de un río que cambió de curso y que estaba produciendo un deslizamiento.

Estabilizado. Movimiento suspendido por obras remediales artificiales.

Relicto. Deslizamientos que probablemente ocurrió hace varios miles de años.

Figura 17. Clasificación de los movimientos del terreno de acuerdo con su estado de actividad. (Bajracharya, 2006).



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

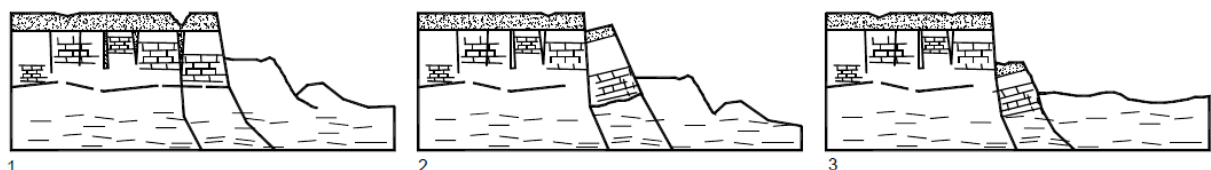
4.1.8.3.5. Secuencia de Repetición

La secuencia se refiere a los movimientos que se inician en un área local y progresan o se repiten en una determinada dirección. Varnes (1978) recomienda utilizar la siguiente terminología:

Progresivo. La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

Retrogresivo o sucesivo. La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento (Figura 18).

Figura 18. Deslizamientos retrogresivos.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Ampliándose. La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales.

Alargándose. La superficie de falla se alarga agregándoles continuamente, volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término “alargándose” puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.

Confinado. Se refiere a los movimientos que tienen un escarpe visible, pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.

Disminuyendo. El volumen de material que está siendo desplazado, disminuye con el tiempo.

4.1.8.3.6. Velocidad del Movimiento

En la tabla 3 se indica la escala de velocidades de movimientos, propuesta por el Transportation Research Board de los Estados Unidos, la cual se considera como escala única de rata de movimiento.

En algunos casos, ocurren diferentes velocidades de los diversos modos de movimiento razón por la cual, se requiere que cada uno de ellos sea definido por separado.

La velocidad del movimiento tiene gran influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. Generalmente, los deslizamientos extremadamente rápidos, corresponden a catástrofes de gran violencia, ocasionalmente con muchos muertos y cuyo escape es poco probable.

Por otro lado, los movimientos extremadamente lentos son imperceptibles (sin instrumentos) y representan un riesgo muy bajo de pérdida de vidas humanas.

Generalmente, la velocidad del movimiento es lenta al principio y puede aumentar (gradual o instantáneamente) aumentar de velocidad de acuerdo con el tipo de movimiento (Figura 19).

Por ejemplo, un movimiento de volteo es extremadamente lento en su inicio (por un largo período de tiempo) pero instantáneamente, puede convertirse en un caído extremadamente rápido.

Otro aspecto importante de la velocidad es que permite monitorear el desarrollo del proceso. Con el tiempo, el monitoreo es muy importante, especialmente en las áreas

urbanas o cuando está amenazada una obra importante de infraestructura (Vías, presas, oleoductos y minería, etc.).

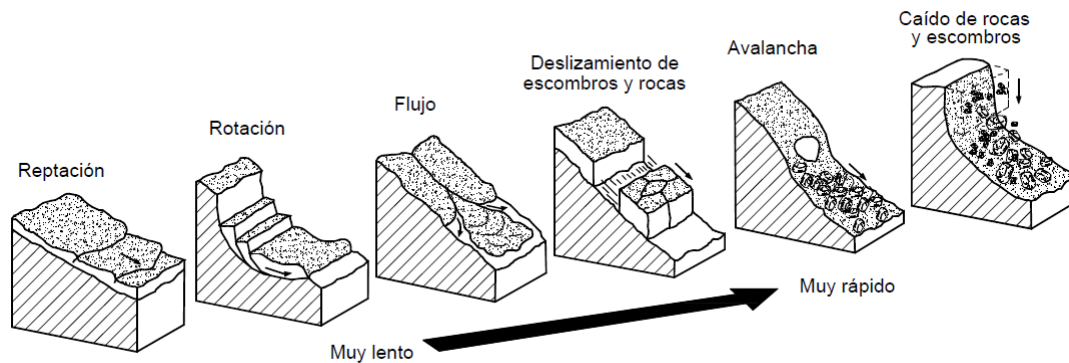
La velocidad se monitorea utilizando inclinómetros para movimientos no muy rápidos y mediante equipos remotos para los deslizamientos o flujos de gran velocidad.

Tabla 3. Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes - 1996).

Clase	Descripción	Velocidad (mm/s.f.)	Desplazamiento	Poder Destructor
7	Extremadamente rápida	5×10^3	5 m/seg.	Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes, escape improbable.
6	Muy rápida	5×10^1	3 m/min	Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
5	Rápida	5×10^{-1}	1.8 m/hora	Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
3	Lenta	5×10^{-5}	1.6 m/año	Construcciones remediales se pueden realizar durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
1	Extremadamente lenta			Movimientos imperceptibles sin instrumentos; posible construcción pero teniendo ciertas precauciones.

Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Figura 19. Velocidad de acuerdo con el tipo de movimiento.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.4. METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídas de roca, flujos, suelos y entre otros.

Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes. Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación ("Toppling") y las fallas en cuña. Igualmente, los métodos de equilibrio límite permiten el análisis combinado con técnicas probabilísticas (Stead y otros, 2000).

En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos. Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos.

Igualmente, se pueden integrar al análisis modelaciones de hidrogeología y las solicitaciones sísmicas.

En la tabla 4 se presenta un resumen de las metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes.

Tabla 4. Metodologías utilizadas en la modelación de taludes.

Método	Parámetros Utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.
Esfuerzo-deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elasto-plásticas y de "creep". Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de "creep".	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada.
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas.
Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones.	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales.
Dinámica de flujos	Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado.

Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.5. CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO

Un análisis de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

La mayoría de los métodos de límite de equilibrio tienen en común, la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla. Las variaciones principales de los diversos métodos son, el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla.

4.1.8.5.1. CONCEPTO DE FACTOR DE SEGURIDAD (F. S.)

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas para plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud, métodos probabilísticos, así como tablas empíricas locales basadas en el comportamiento típico de los taludes.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “límite de equilibrio” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del factor de seguridad.

Otro criterio es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias disponibles al cortante}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante}}$$

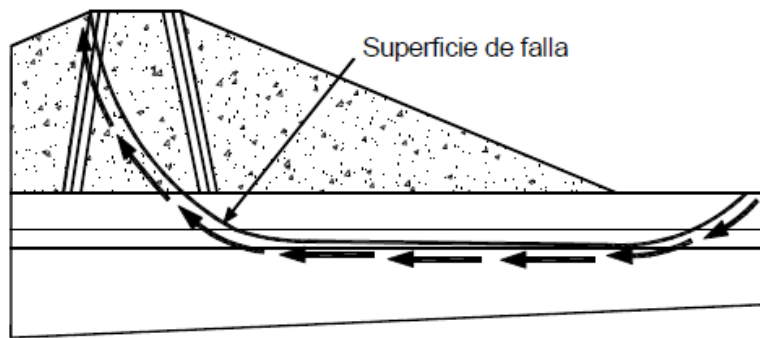
$$F.S. = \frac{\sum \text{Momentos resistentes disponibles}}{\sum \text{Momentos actuantes}}$$

4.1.8.5.2. CONCEPTO DE SUPERFICIE DE FALLA

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (Figura 20); sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente. En los métodos de límite de equilibrio el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla.

Generalmente, se asume un gran número de superficies de falla para encontrar la superficie de falla con el valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina “superficie crítica de falla”. Esta superficie crítica de falla es la superficie más probable para que se produzca el deslizamiento; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, los cuales también se requiere tener en cuenta para el análisis.

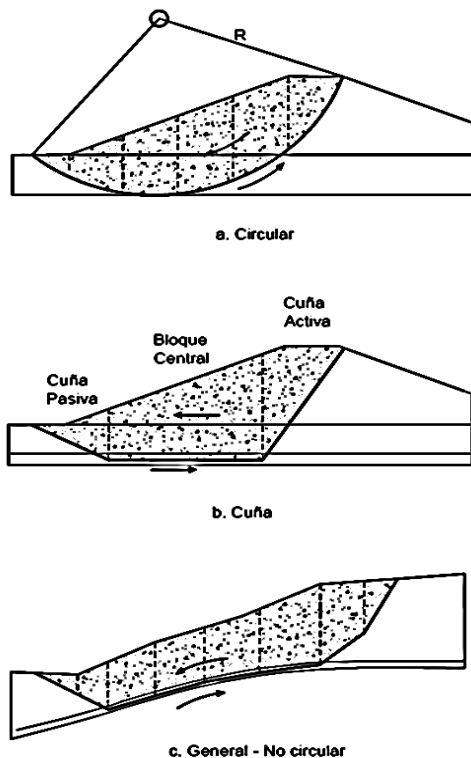
Figura 20. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante (U. S. Corps of Engineers, 2003).



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Formas de la superficie de falla. Las técnicas de límite de equilibrio se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación sobre superficies de falla determinadas (Figura 21). Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de éstas. En los últimos años, se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica.

Figura 21. Formas de la superficie de falla (U. S. Corps of Engineers, 2003).



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Análisis de superficies planas. Cuando existen discontinuidades planas en la roca o en el suelo del talud, se acostumbra realizar el análisis de falla a traslación. Esta técnica asume el deslizamiento traslacional de un cuerpo rígido a lo largo de un plano o a lo largo de la intersección de dos planos, como el caso de la falla en cuña.

Análisis de superficies curvas. En los suelos o rocas blandas, las superficies de falla a deslizamiento tienden a tener una superficie curva. A estas superficies se les conoce como “círculos de falla o superficies de falla rotacionales”. En los análisis de estabilidad, se debe determinar la localización de la superficie crítica de falla y el factor de seguridad a lo largo de esta superficie.

Las grietas de tensión. La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar (Figura 22); la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente, la grieta puede llenarse con agua. En el caso de las lluvias, se pueden generar presiones de poros transitorias que afectan la estabilidad del talud.

La profundidad de las grietas de tensión puede determinarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Donde:

z_c = Profundidad de la grieta de tensión.

ϕ = Ángulo de fricción interna

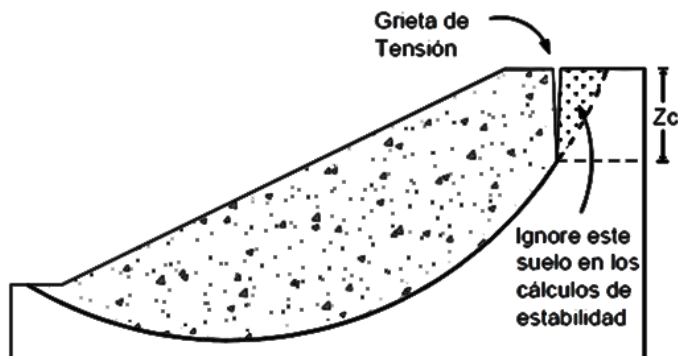
c = cohesión.

γ = Peso unitario del suelo.

f = Ángulo de fricción.

La presencia de grietas de tensión dificulta, en forma considerable, la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Las grietas de tensión son muy importantes y profundas en los cortes de taludes donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación.

Figura 22. Esquema de una grieta de tensión para análisis de límite de equilibrio (U. S. Corps of Engineers, 2003).



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.6. PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO

Los modelos tienen en cuenta los factores primarios que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujo de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático de límite de equilibrio. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque de límite de equilibrio no produce resultados satisfactorios.

Pesos unitarios. El peso unitario es tal vez el parámetro más sencillo de medir para el análisis de estabilidad de los taludes, es el que influye menos en el factor de seguridad. Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático y saturados por debajo de este nivel. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático. La densidad saturada se puede determinar asumiendo un valor de gravedad específica G , el cual se puede suponer igual a 2.68 para la mayoría de los suelos (Cornforth, 2005).

Resistencia al cortante. La resistencia al cortante que se va a utilizar en los análisis, puede ser medida por alguno de los métodos de laboratorio o de campo. Se debe tener en cuenta si se trata de condiciones drenadas o no drenadas o si el análisis es

realizado en estado no-saturado. Los parámetros deben corresponder a los niveles de esfuerzos sobre las superficies de falla potenciales. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda emplear las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977, 1985). Igualmente, debe tenerse en cuenta la disminución de resistencia, con el tiempo. Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas, es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada a partir de los ensayos no-consolidados no-drenados.

Para los suelos parcialmente saturados, tales como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas deben obtenerse a partir de ensayos no-consolidados, no-drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en el campo. La envolvente de falla para esos suelos generalmente, es curva y por lo tanto, es importante utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento tanto en los ensayos de laboratorio como en los de campo.

Condiciones drenadas o no drenadas. Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por los cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior (en suelos de baja permeabilidad) éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso, se dice que las condiciones son no drenadas.

Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poros en exceso y se comportan en condiciones drenadas. Para las ratas normales de carga que equivalen a meses o semanas, se pueden considerar drenados suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg. En cambio, los suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg, se consideran no drenados. Mientras, las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas.

Esfuerzos totales y efectivos. Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada; sin embargo, en la

práctica es virtualmente imposible determinar con precisión cuáles son los excesos de presión de poros que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua).

Debido a esto, no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. No obstante, se puede trabajar todo el análisis usando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poros en las condiciones no drenadas. La mayoría de los modelos de análisis trabajan con base en las presiones efectivas.

4.1.8.7. ESTABILIDAD A CORTO Y A LARGO PLAZO.

En la estabilidad a corto plazo debe tenerse en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido, están sujetos a presiones de poros por acción de las cargas aplicadas. En la estabilidad a largo plazo, se supone que los suelos están drenados. Para la estabilidad (a corto plazo) de las arcillas normalmente consolidadas y de limos, se recomienda modelar con análisis de esfuerzos totales. Aunque se puede realizar el análisis empleando esfuerzos efectivos, es muy difícil estimar o medir las presiones de poros para su utilización en el análisis.

Para las arcillas sobreconsolidadas, el análisis de estabilidad a corto plazo, prácticamente es imposible de realizar, debido a que la resistencia del suelo cambia muy rápidamente con el tiempo. En este caso, se recomienda utilizar la experiencia local en la formación arcillosa específica analizada y usar criterios empíricos (Cornforth, 2005).

La estabilidad a largo plazo, es más fácil de analizar que la estabilidad a corto plazo. Para todos los casos, se recomienda emplear análisis de esfuerzos efectivos.

4.1.8.8. LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO

Los análisis de límite de equilibrio tienen algunas limitaciones entre las cuales se encuentran las siguientes:

- *Se basan solamente en la estática.* Como los métodos de límite de equilibrio se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las

distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.

- *Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos.* Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura.

- *Utilizan modelos de falla muy sencillos.* El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de límite de equilibrio es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud.

- *Generalmente se asume el material como isotrópico.* La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas.

A pesar de las debilidades de un modelo específico, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones. Los métodos de límite de equilibrio son una herramienta muy útil en la práctica y se recomienda tener cuidado de no abusar en la aplicación del método para casos complejos donde la distribución de esfuerzos y las deformaciones juegan un papel importante en el comportamiento del talud (Krahn, 2004).

4.1.8.9. MÉTODOS LÍMITE DE EQUILIBRIO

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de límite de equilibrio. Este sistema supone

que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

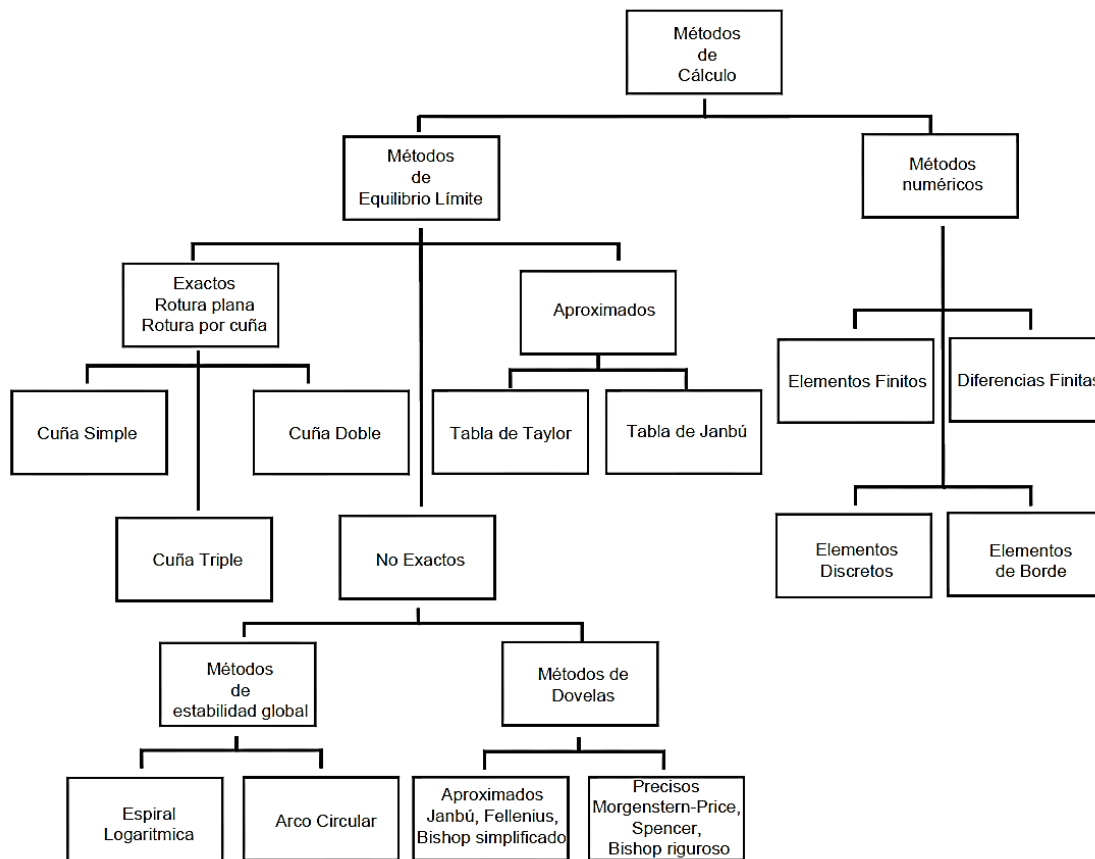
El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius (1936). Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados (Figura 23). Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión. En la tabla 5 se enumeran algunos de los métodos más utilizados.

Tabla 5. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

Figura 23. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.



Fuente: Libro deslizamientos: Análisis Geotécnico. Jaime Suarez.

4.1.8.10. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

De acuerdo con lo citado por Gonzales de Vallejo, la estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad).

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos.

4.1.9. METODOLOGÍA

El proyecto a realizar es una investigación de tipo cuantitativa, donde es necesario para el alcance de los objetivos propuestos las siguientes etapas a continuación:

- El análisis detallado de la bibliografía existente referente a los antecedentes del área de estudio, en este apartado se lleva a cabo una compilación de las fuentes de información otorgadas por la empresa DRUMMOND LTD, relacionadas con el objeto de estudio, en ella se incluyen estudios anteriores los cuales servirán como base de datos complementaria a la información obtenida en campo.
- Estudio de la geología local de la zona determinando las litologías que se hallan en el subsuelo, para esta actividad se hace necesario un reconocimiento del área de estudio para su localización exacta, seguidamente se procederá a solicitar la base de datos de registros de pozos perforados al área de Geología de la empresa DRUMMOND LTD, para así determinar la geología precisa del subsuelo para luego realizar un modelo geológico del área.
- Levantamiento topográfico para tener una visión clara y detallada del terreno, para este caso se hará uso de un equipo especializado GPS GR3, el cual facilita la toma de datos debido a la rapidez y la fácil manipulación, esta información será necesaria para la realización de las superficies en 3D, DTM y perfiles topográficos.
- Software Carlson, se hace necesario su uso para el procesamiento de los datos obtenidos anteriormente y generar superficies en 3D, asimismo para realizar perfiles topográficos y cortes geológicos del área.
- Software Slide, en esta etapa el producto obtenido de Carlson será importado tanto en 2d como en 3d al software Slide de Rocscience para llevar a cabo el respectivo análisis determinando y tener una visión clara de la estabilidad en que se encuentra la estructura.

- Monitoreo con prisma y estación total, este apartado se llevará a cabo un programa de monitoreo puntual al área a estudiar, esto para llevar un registro del comportamiento de la escombrera, los datos obtenidos se analizarán de acuerdo al criterio de Fukosono, Crudes y Varnes, para predecir posibles mecanismos de fallas en curso.
- Finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos y se tomarán las diferentes recomendaciones para las medidas adecuadas de corrección y prevención, este trabajo se llevará a cabo durante toda la duración de la práctica empresarial aproximadamente 6 meses.

4.1.10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 24. Cronograma de actividades Realizadas

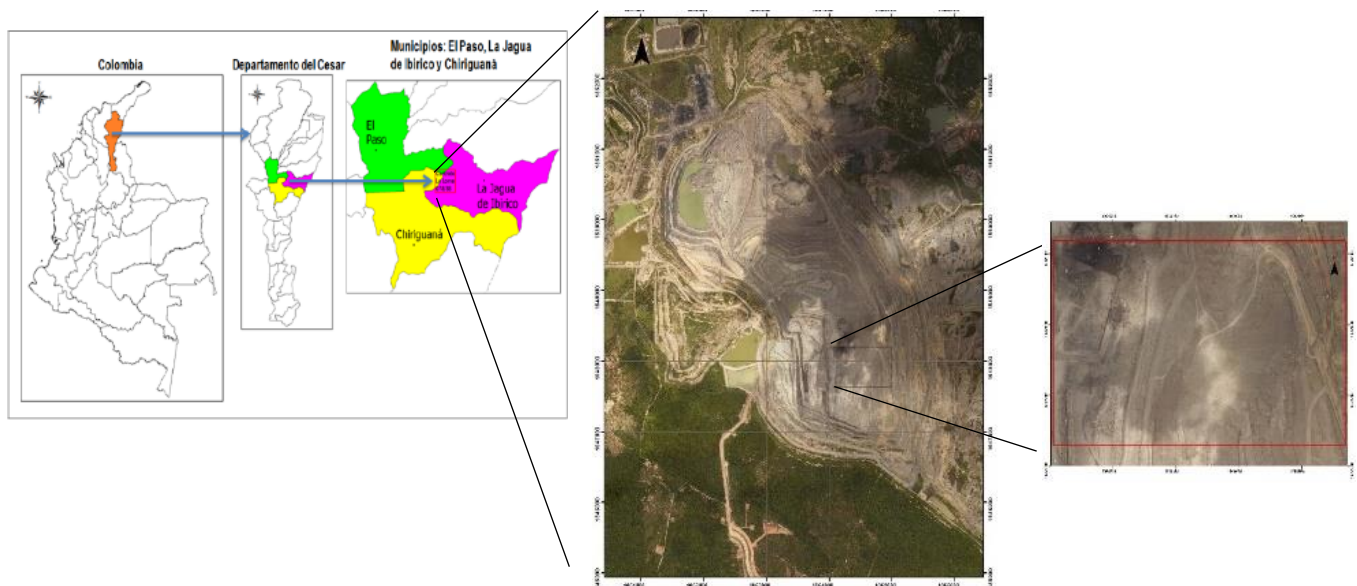
Fase 1	PERÍODO: 2017-2 / 2018-1																											
	MES: Agosto				MES: Septiembre				MES: Octubre				MES: Noviembre				MES: Diciembre				MES: Enero				MES: Febrero			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica																												
Estudio geológico																												
Levantamiento topográfico																												
Monitoreo de escombrera																												
Fase 2																												
Procesamiento de datos en software Carlson																												
Construcción de modelo bidimensional y tridimensional del área																												
Análisis en software slide																												
Fase 3																												
Interpretación de resultados																												
Recomendaciones de corrección y prevención																												
Entrega Final																												

Fuente: Autor

4.1.11. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en jurisdicción de los municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso y Chiriguana en el Departamento del Cesar, dentro de la Cuenca Cesar – Ranchería, la topografía original es plana con diferencias de relieve de no más de 10 m, con una precipitación media multianual de 1700 mm/año, esta presenta múltiples drenajes superficiales que conducen la escorrentía en dirección SE. Se localiza aproximadamente a 15 kilómetros al este del corregimiento de La Loma, por la vía que comunica a Curumaní con Bosconia. Limita al Norte con la Mina Calenturitas operada por la firma Prodeco, hacia el Este con el Municipio de la Jagua de Ibirico, al Oeste con la vía nacional Curumaní – Bosconia y al sur con el municipio de Chiriguana, esta es una empresa carbonífera del sector minero dedicada a la explotación, producción y exportación de carbón e hidrocarburos. El área total de la concesión minera otorgada por el Ministerio de Minas y Energía, es de 5740 Hectáreas y cuenta con alrededor de 5678 empleados. Ver Figura 25.

Figura 25. Mapa ubicación Mina Pribbenow y Área de estudio.



Fuente: Autor

La evolución de la cuenca del Cesar – Ranchería desde el periodo Jurásico presenta movimientos epirogenéticos asociados al Rifting necesario para la apertura del Mar Caribe, permitiendo levantamientos y la formación de grabens, junto a la depositación de espesas secuencias (Formación Guatapurí – La Quinta - Norean) con un fuerte aporte de corrientes turbidíticas, flujos de lodos y materiales piroclásticos provenientes de volcanes de rift o arcos volcánicos. En general, se tienen periodos de extensión, subsidencia y vulcanismo asociado a la depositación, deformación y redepositación especialmente a lo largo de las márgenes de graben a través del Triásico – Jurásico (Maze, 1984).

Hacia el Cretácico temprano inicia la subsidencia que causa una trasgresión marina, depositando areniscas y conglomerados de la Formación Rio Negro o el conglomerado basal del Grupo Cogollo. La subsidencia continúa y se forma finalmente un ambiente depositacional marino para el Barremiano. Este ambiente prevalece hasta el Coniaciano, depositándose calizas y shales calcáreos ricos en materia orgánica (Grupo Cogollo y Formación La Luna).

El comienzo del cenozoico, se caracterizó por una depositación no marina de areniscas, areniscas carbonáceas, lutitas carbonáceas y capas de carbón. Durante el oligoceno temprano y tardío se inicia el estilo tectónico de bloques que involucra el basamento culminando en el Plioceno con el cabalgamiento al NW de la Sierra Nevada de Santa Marta y al SE de la Serranía del Perijá. En esta misma época se inicia una ligera invasión del mar, originando la depositación de la Formación Ciénaga de Oro en la parte plana.

Hacia el mioceno inicia una fase distensiva de la cuenca que origina la depositación de grandes espesores de sedimentos y otros de menor espesor, reflejando la forma y comportamiento de la cuenca. La subsidencia continúa originando fallas normales con un tren estructural NW y originando pliegues sinclinales amplios y anticlinales estrechos. Finalmente, durante el Plioceno – Pleistoceno, se presentaron regresiones y transgresiones que permitieron la acumulación de la Formación Cuesta, con características variables donde se presentan ambientes continentales – deltaico de ríos trenzados a marinos de plataforma somera, para ser afectados por una regresión donde se acumularon los sedimentos netamente continentales de la Formación Cuesta (Hernández, 2003).

4.1.12.2. ESTRATIGRAFÍA

Las unidades litológicas que abarcan parte de la subcuenca del Cesar varían desde el Paleozoico hasta los depósitos cuaternarios aluviales, reconociéndose tres megasecuencias depositadas en el Mesozoico y el Cenozoico: una sucesión del Triásico – Jurásico, un ciclo Cretácico – Paleoceno y una serie de secuencias continentales más recientes con edades desde el Eoceno Superior a Cuaternario. Ver figura 28.

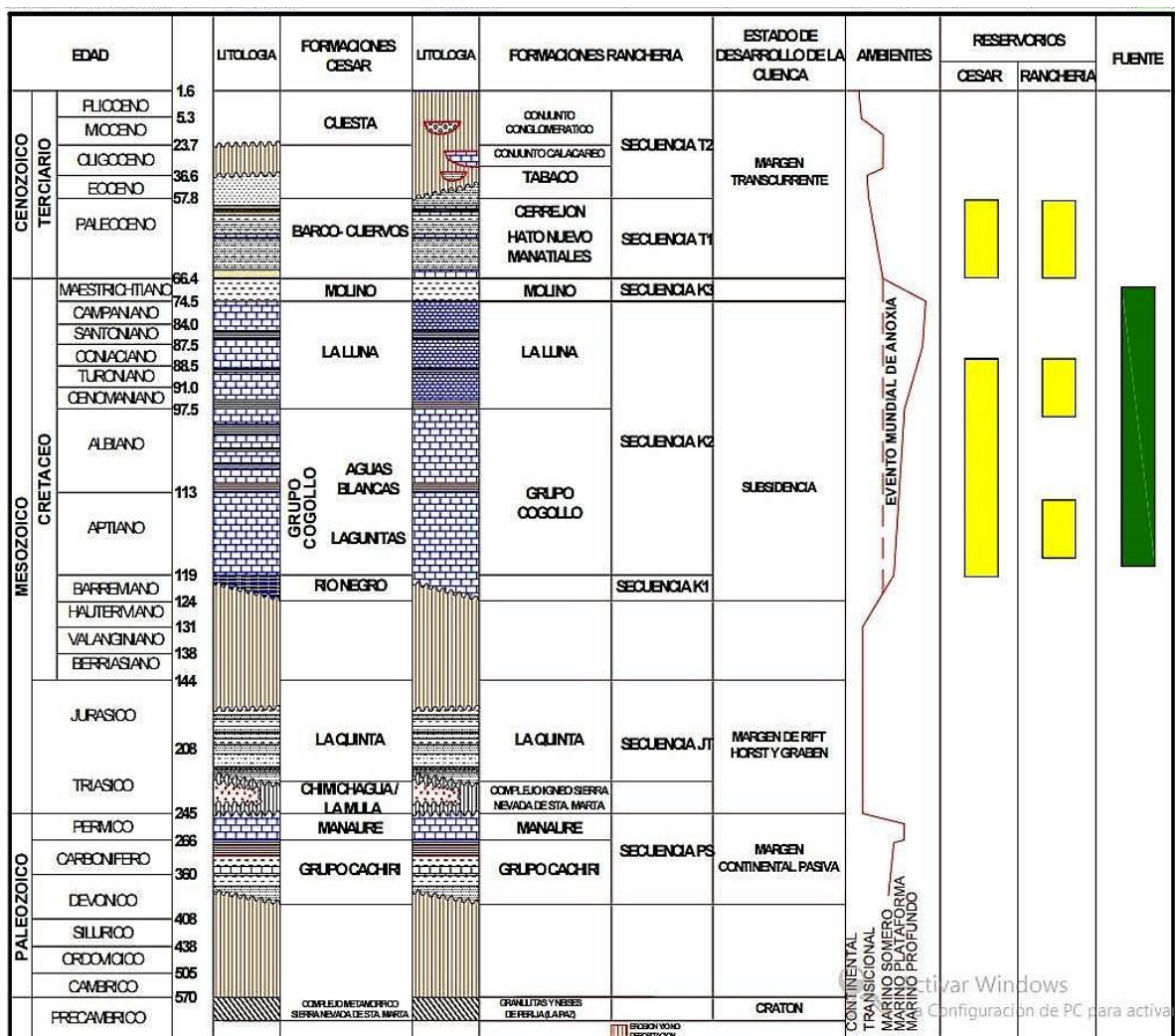


Figura 28. Columnas estratigráficas, Correlaciones Formaciones Cesar y ranchería. ANH

- Paleozoico - Unidad Metasedimentaria de La Virgen (Pzmv).

Está compuesta por rocas sedimentarias que han sido afectadas por metamorfismo regional de bajo a muy bajo grado, dispuestas en capas delgadas y medianas; metareniscas, metalimolitas, metalodolitas, metaconglomerados y en menor

proporción filitas, esquistos y cuarcitas. Algunos autores, describen al oriente de La Jagua de Ibirico una secuencia espesa y monótona de metarcillolitas y metalodolitas rojas, ocasionalmente gris azulosa, finamente laminadas, con brillo sedoso; metareniscas de grano fino, gris verdosa, micácea y muy deleznable, donde el metamorfismo es menos visible; se observan concentraciones de cuarzo lechoso, de segregación, y está asociado principalmente con las metarcillolitas. Interestratificado con las metalimolitas se encuentra un conglomerado con cantos subredondeados de cuarzo lechoso, cuarcita blanca, areniscas de grano fino, chert, rocas volcánicas y esporádicamente limolitas rojas y verdes (Hernández, 2003). Ver figura 28

- Cretácico - Formación Río Negro (K1r).

Constituida por areniscas y conglomerados de granulometría y composición variada con esporádicas intercalaciones de arcillolitas y limolitas grises y pardas. Se presenta en capas gruesas con abundante estratificación cruzada. Las rocas van de arcosas líticas a cuarzoarenitas con tamaño de grano fino a grueso y mala selección. (Hernández, 2003). Ver figura 28.

- Cretácico - Grupo Cogollo (K1c).

Compuesto por las formaciones Lagunitas, Aguas Blancas y La Luna. Ver figura 28.

Formación Lagunitas: constituida por estratos de calizas grises en capas medianas y gruesas variando de wackstone a grainstone y calizas arenosas grises azuladas, pardas y negras, macizas micríticas y densas formando capas de espesor variable.

Formación Aguas Blancas: En la subcuenca de Cesar se reconocen tres miembros para esta formación: El Miembro Aminas: compuesto por biomicritas negras intercaladas con lutitas carbonosas fosilíferas; El Miembro Tucuy: compuesto por lutitas negras que hacia el tope presentan intercalaciones de areniscas glauconíticas y calizas arenosas. Se caracteriza por el bajo porcentaje de carbonatos; El Miembro Maracas: También conocido como miembro guayacán en el área de Catatumbo, que presenta biomicritas negras con abundante bitumen. (Hernández, 2003).

Formación La Luna (K2I): Compuesta por una alternancia de limolitas, arcillolitas, lutitas negras carbonosas y calcáreas, calizas bituminosas carbonosas, capas de chert negro azulado, concreciones, nódulos elipsoidales con estratificación plano-

paralela con diferentes diámetros (2cm a 1m de diámetro). Las lodolitas están predominantemente hacia la base de la formación, al igual que las capas de chert, mientras que las calizas son comunes en la parte superior. Es frecuente encontrar foraminíferos, amonites muy bien preservados, algunos bivalvos y restos de peces. (Hernández, 2003).

- **Paleógeno Neógeno**

A este periodo pertenecen las formaciones Barco, Los Cuervos, y Cuesta, siendo la formación Los Cuervos la de mayor interés ya que es en esta en donde se han desarrollado las actividades de explotación minera, objeto del presente estudio. A continuación, se procede a describir las características principales de cada una de las formaciones antes mencionadas. Ver figura 28.

Formación Barco (E1b). Conformada por areniscas de grano fino, subangulares, deleznales, ligeramente arcillosas y micáceas, laminación plano-paralela y estratificación cruzada con intercalación de delgadas capas de arcillolitas. Presenta también lutitas y arcillolitas grises, micáceas y carbonáceas con pequeños glóbulos de siderita representando la mitad de la formación. Hacia la parte superior de la formación se encuentran algunos mantos de carbón. (Hernández, 2003).

Formación Los Cuervos (E1c). La formación presenta tres miembros basados en su composición y morfología: inferior, medio y superior.

- **Miembro Inferior.** Caracterizada por la presencia de limolita gris oscura con nódulos ferruginosos; subarcosas a arcosas de grano fino a medio compuestas por cuarzo, feldespato, mica, con óxidos de hierro en laminación plana a ondulosa. Arcillolita carbonosa y abigarrada con niveles de carbón. La base del miembro se caracteriza por ser arenosa y los niveles de limolita y arcillolita aumentan hacia la parte media y techo del miembro (Hernández, 2003).
- **Miembro Medio.** Compuesta por potentes bancos de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, gris claras y rojizas, sublitoarenitas y niveles ferruginosos de 50 a 70 cm de espesor generando gruesas costras de hierro por

intemperismo. Las areniscas se intercalan con niveles arcillosos y limosos (Hernández, 2003).

- Miembro Superior. Está constituido por principalmente por rocas de carácter arcillo limoso, intercaladas con delgados niveles arenosos y carbón en estratos de pocos centímetros a metros de espesor. De manera general, está constituido por cuerpos de arcillolitas, arcillolita shale carbonosa, limolitas, capas de carbón y en menor proporción, areniscas de grano fino. Las arcillolitas son de color gris, gris oscuro, gris amarillento y moteado; micáceo con nódulos ferruginosos, restos vegetales fósiles incompletos, canales de alimentación y fragmentos de carbón; laminación plana a ondulosa paralela a subparalela, continúa a discontinua, lenticular y masiva; geometría tabular.

Formación Cuesta (N1c). Consiste en interdigitaciones de conglomerados ferruginosos limolitas y arcillolitas con areniscas deleznales que presentan estratificación cruzada y areniscas conglomeráticas. La formación evidencia algunos sedimentos semiconsolidados dispuestos en capas horizontales con inclinaciones muy suaves. El contacto superior con el cuaternario contiene areniscas muy ferruginosas y el inferior es discordante con la Formación Los Cuervos. (Hernández, 2003).

Cuaternario - Terrazas (Qt). Conformadas por cantos y bloques de hasta 1,50 m de diámetro, guijos y gravas de areniscas silíceas muy bien cementadas, duras de grano medio hasta conglomerático. Algunos de los bloques son de calizas silíceas duras embebidos en una matriz areno lodosa. Ver figura 28.

Cuaternario - Depósitos de abanico (Qp). Corresponden a los depósitos acumulados hacia el pie de monte de la Serranía del Perijá, constituidos por gravas, arenas y arcillas siendo el material aportante las formaciones Paleozoicas, Triásicas, Jurásicas y Cretácicas que afloran en la serranía. Generan un relieve plano a ligeramente inclinado. La esfericidad de las gravas varía de baja a alta debido a diferentes regímenes de transporte. (Hernández, 2003). Ver figura 28.

Cuaternario - Depósitos Aluviales (Qal). Están formados principalmente por gravas, arenas, limos y arcillas; según el sector que atraviesan forma planicies rojizas o amarillentas. En su mayor parte corresponden a acumulaciones en áreas pequeñas con delgados espesores que se han depositado en el fondo de valles profundos de algunos ríos y quebradas. Su composición y textura es heterogénea y dependen del área fuente que aporta los materiales y los regímenes de las corrientes que los han depositado. (Hernández, 2003). Ver figura 28.

4.1.12.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El estilo estructural de la zona está relacionado principalmente con la evolución tectónica de la Serranía de Perijá y la Cuenca Cesar - Ranchería. La Serranía de Perijá, está estructuralmente levantada entre la Cuenca de Maracaibo y los valles de los ríos Cesar y Ranchería. Esta región, se caracteriza por un estilo principalmente compresivo y las estructuras formadas obedecen al tren estructural regional NE-SW produciendo pliegues sinclinales como Buenavista, Nueva Granada, Ojinegro, Las Delicias, Loma Redonda, Cerro Largo, La loma, La Jagua y anticlinales como Tucuy, La Estancia, Becerril, Paraíso, La Jagua y Arenas Blancas. Ver figura 28.

Algunos de estos pliegues se ubican en la sub cuenca del César y en cercanías a la concesión La Loma entre los que se resaltan:

Sinclinal La Loma y anticlinal Tucuy. Presentan una dirección NE-SW afectando la secuencia de areniscas de grano grueso y conglomerados de la Formación Cuesta y Los Cuervos. Los flancos presentan inclinaciones en 13° y 18°. (Hernández, 2003).

Sinclinal Los Venados y Anticlinal de Becerril. Hace parte de una sucesión de pliegues cuya tendencia es NE-SW afectando rocas de las formaciones Cretácicas a Neógenas. (Hernández, 2003).

Sinclinal la Jagua. Es un pliegue ligeramente asimétrico, de forma ovoide, afectando rocas de la Formación Los Cuervos y cuya dirección es N55°E. La estructura hacia el sur es amplia y en el costado norte cierra con un cabeceo al Oeste (Hernández, 2003). Los sistemas de fallas en la zona de estudio pueden clasificarse según su dirección como: fallas de dirección NE entre las que sobresalen la Falla Perijá, Arenas blancas,

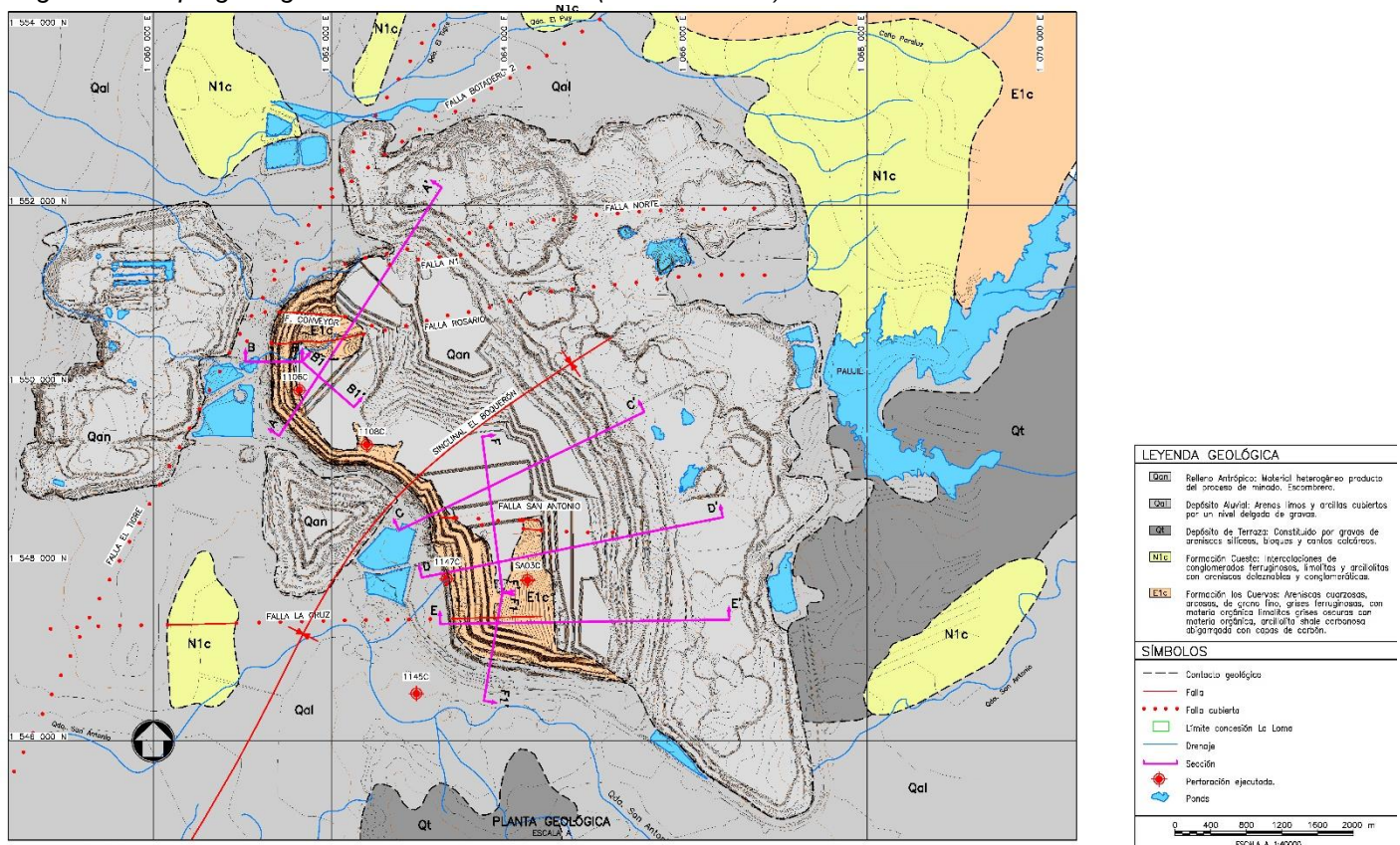
Fuente: Drummond Ltd

4.1.12.4. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La mina La Loma (también llamada Pribbenow) como depósito de varios mantos de carbón se enmarca dentro de la concesión del mismo nombre perteneciente a la subcuenca del Cesar. En el área que cobija la concesión, se han encontrado varias

estructuras de fallamiento y plegamiento las cuales han servido para sectorizar la mina en tres frentes de trabajo: Pit Norte, Pit Central y Pit Sur. Las operaciones mineras se localizan dentro de un gran sinclinal que ha producido variación en los buzamientos de los mantos, afectando la formación que los contiene, F.Cuervos. A continuación, se describe de manera más detallada la litología y estructuras que afectan el área de la mina basados en la información suministrada por la compañía Drummond Ltd. Se presenta el mapa geológico (figura 30) local con varias secciones en donde se observa todo lo relacionado con este capítulo. Ver secciones en anexos A.

Figura 30. Mapa geológico local Mina Pribbenow (DrummondLtd).

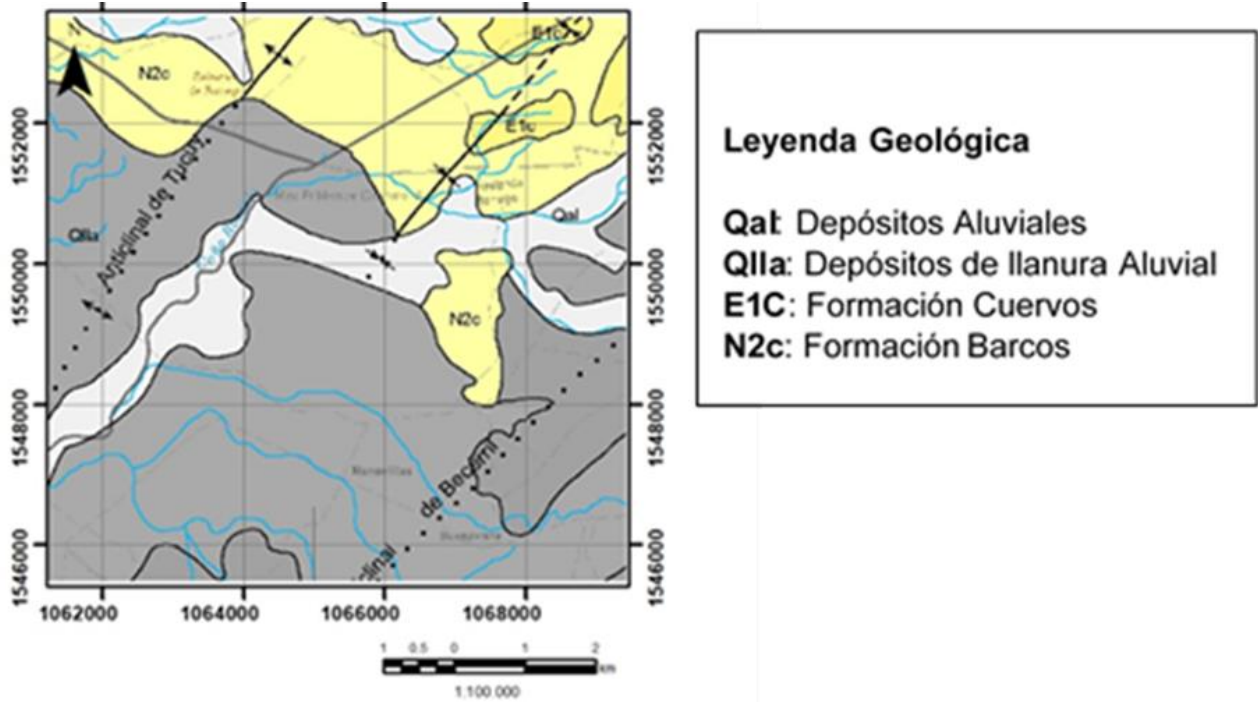


Fuente: Drummond Ltd

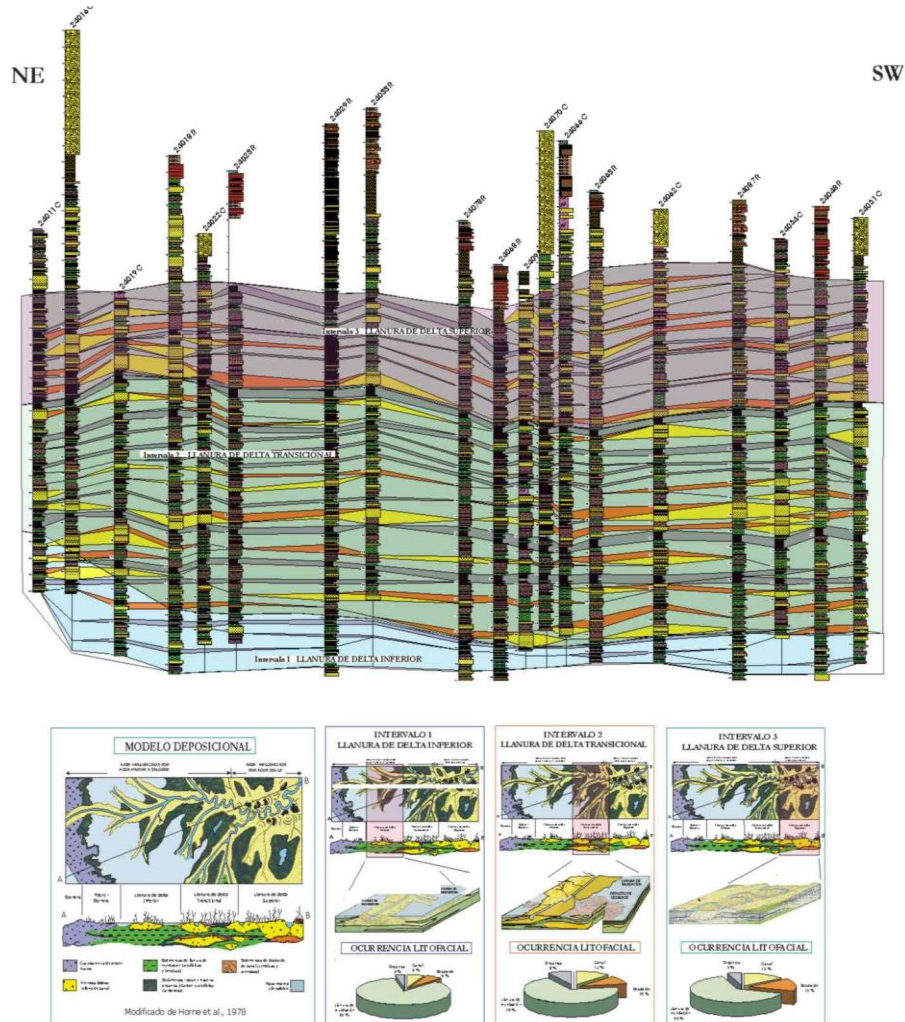
4.1.12.4.1. ESTRATIGRAFÍA LOCAL

En el área de la mina afloran rocas pertenecientes a las formaciones Los Cuervos, Cuesta y Depósitos aluviales. Ver figura 31.

Figura 31. . Mapa Geológico concesión mina Pribbenow. Tomado de SGC PL48.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano PL48



- Intervalo 1 - Llanura Inferior de Delta
- Intervalo 2 - Llanura de Delta Transicional
- Intervalo 3 - Llanura de Delta Superior

Figura 32. Interpretación y Modelo Depositacional. (Drummond Ltd)

Formación Los Cuervos (E1c). Aflora en las zonas de explotación (Pit Norte, Central y Sur), pared alta y nivel base de la mina, donde se inicia el retrolleado (Escombrera 4). En los afloramientos se observa el nivel medio de la formación evidenciando mantos de carbón interestratificados con areniscas de grano fino a grueso, con coloración grisácea y amarillenta, limolitas, arcillolitas y arcillolitas carbonosas. Los estratos presentan una baja continuidad lateral mientras los mantos de carbón son continuos con espesores que varían entre 1 y 4,5m. Los contactos de las capas rocosas tienden a ser gradacionales y en los mantos de carbón son netos, fácilmente distinguibles. En esta Formación no se observan afloramientos de agua, solamente aquella que escurre sobre la roca expuesta por las labores mineras procedente del depósito aluvial.

Fotografía 9. Formación Los Cuervos en el costado Sur del Pit minero.



Fuente: Drummond Ltd

Los mantos de carbón son considerados excelentes marcadores lito y cronoestratigráficos; representan períodos de no deposición clástica en la cuenca durante los cuales dominan los procesos que permiten la acumulación de turba. Un manto representa intervalos de tiempo del orden de miles años con condiciones constantes en la cuenca (Modificado de Nemec, 1990).

Es considerada la unidad portadora de carbones es formalmente llamada Formación Los Cuervos. Esta unidad fue definida en la Cuenca del Catatumbo por Nostentein et al. (1944). En la descripción original se definió como una unidad compuesta por una sucesión de arcillolitas con presencia de mantos de carbón al piso de la secuencia, e intercalación de bancos de areniscas. El espesor original reportado varía entre 245 m y 490 m. La edad de la Formación Los Cuervos va desde el Paleoceno hasta el Eoceno temprano.

En las áreas de los contratos La Loma, Descanso en su sector Sur, Rincón Hondo y Similoa, se pueden correlacionar 33 mantos dentro de la unidad portadora de carbón. Durante la fase de descripción litológica se identificaron catorce tipos de roca (p. e. arenisca fina, arcillolita, carbón, etc.), las cuales a su vez fueron agrupadas en cinco categorías (o facies) de acuerdo a su aspecto, características físicas y geometría. Las cinco categorías fueron: canal, desborde de canal (crevasse splay), llanura de inundación, facies rica en orgánicos y facies marina. Las facies y asociaciones de facies fueron definidas después de integrar la información de núcleos de perforación y los resultados del trabajo de campo en los afloramientos. (Ver fotografía 9)

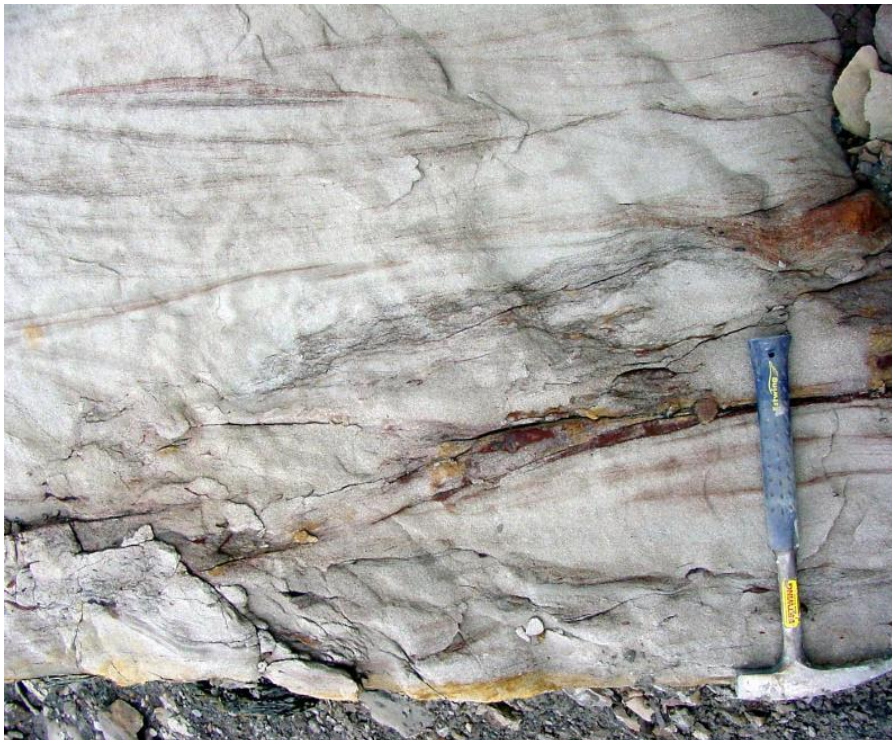
Facies De Canal. La facies de canal consiste de areniscas grisáceas de grano fino a medio a areniscas carbonáceas de apariencia “sal y pimienta” (modificado de Vessey & Bustin, 2000) Los canales ocurren como cuerpos individuales de geometría tabular a lenticular con espesores que alcanzan hasta 12 m y con extensiones laterales de hasta 1 Km en esta área. Presentan una base erosional con depósitos conglomeráticos de fondo y con intraclastos de arcillolita o fragmentos de carbón y son típicamente de secuencia granodecreciente. (Fotografía 10). Las principales estructuras sedimentarias son: estratificación cruzada planar, estratificación cruzada en artesa, laminación ondulosa y ocasionalmente estratificación convoluta. (fotografía 11).

Fotografía 10. Contacto erosivo arenisca carbón. Note fragmentos de carbón e intraclastos de arcillolita en la arena. El diámetro del núcleo es de aproximadamente 5 cm).



Fuente: Drummond Ltd

Fotografía 11. Estratificación cruzada planar y en artesa a la base de un canal de arenas. Tomada en Rampa 3 de la pared del pit de Mina Pribbenow.



Fuente: Drummond Ltd

Las areniscas de canal comúnmente tienen contactos superiores gradacionales con sedimentos de facies de llanura de inundación y de desborde (crevasse splay).

Facies de desborde “crevasse splay”. Las facies de desborde consisten en general de limolitas grises claras a oscuras a areniscas cuarzosas de grano fino intercaladas localmente con arcillolitas (Modificado de Vessey & Bustin, 2000). Son comunes en esta facies las secuencias granocrecientes las cuales ocurren en unidades de hasta 3 m de espesor. Estas unidades granocrecientes presentan bases gradacionales o planares las cuales gradan de limolita o arcillolita limosa a la base, hasta areniscas de grano fino. Las principales estructuras sedimentarias presentes son: estratificación cruzada en artesa y planar en juegos de hasta 0.5 m de espesor en arenisca, y laminación ondulosa en limolita (Foto 12).

Fotografía 12. Intercalaciones de limolita con laminación ondulosa y arcillolita.



Fuente: Drummond Ltd

Las secuencias granocrecientes ocurren como una progradación de los desbordes en cuerpos quietos de agua (Horne et al., 1978). Las facies de desborde ocurren comúnmente como una unidad gradacional entre la arenisca de canal y la facies de llanura e inundación.

Facies De Llanura De Inundación. Las facies de llanura de inundación consisten en arcillolitas grisáceas, ocasionalmente intercaladas con limolitas cuarzosas y esporádicas areniscas finas. (Modificado de Vessey & Bustin, 2000). La estructura sedimentaria dominante en arcillolita es la laminación paralela, pero también son comunes la laminación ondulosa, laminación convoluta y las limolitas masivas. Las arcillolitas son comúnmente masivas y localmente con presencia de madrigueras (burrows) (Foto 13).

Fotografía 13. Intercalaciones de arcillolita con láminas gruesas de arenisca. Note la abundante bioturbación con dominancia de madrigueras verticales.



Fuente: Drummond Ltd

Las estructuras sedimentarias, la presencia ocasional de arcillolita carbonosa y la bioturbación sugieren una acumulación de baja energía en los desbordes distales de canal y en la suspensión de una llanura aluvial de inundación (Vessey & Bustin, 2000). Las facies de llanura de inundación están comúnmente intercaladas con depósitos de desborde, lo cual sugiere una acumulación en un ambiente más clástico que carbonífero, los cuales predominan en las llanuras de inundación distales durante períodos de actividad fluvial (Fotografía 14). Esta facies se encuentra comúnmente a lo largo de la secuencia.

Fotografía 14. Arquitectura litofacial en una pared de Mina Pribbenow.



Fuente: Drummond Ltd

Fotografía 15. Segmento con dominancia de facies de llanura inundación representado por litologías (arcillolitas). Note el contacto neto sobre facies ricas en materia orgánica. (Manto Rouzaud en Mina Pribbenow, Los lentes más competentes corresponden a depósitos de desbordes distales).



Fuente: Drummond Ltd

Facies Ricas En Materia Orgánica. Las facies ricas en materia orgánica están compuestas por carbón y arcillolita carbonosa las cuales comúnmente presentan contactos gradacionales entre ellas. Las arcillolitas carbonosas son grises oscuras a negras – marrón con abundante fragmentos de raíces y plantas (Fotografía 16). La laminación paralela es la estructura dominante y consiste comúnmente de material de plantas finamente macerado. El carbón es la facies rica en materia orgánica más común, formando mantos de hasta 10 m de espesor. La continuidad lateral es variable, algunos de los mantos más gruesos pueden extenderse por kilómetros, otros solo algunos metros. Los mantos más espesos comúnmente se dividen en múltiples submantos. (Vessey & Bustin, 2000).

Fotografía 16. Fragmentos de plantas en arcillolita carbonosa.



Fuente: Drummond Ltd

La arcillolita carbonosa con presencia de raíces generalmente infrayace los mantos de carbón, indicando que el carbón es autóctono y que la deposición de la turba comenzó lentamente en respuesta a la terrestrialización. Los mantos de carbón comúnmente gradan a arcillolita carbonosa, excepto dónde han sido erosionados por areniscas de canal y por facies de desborde. La erosión indica que la deposición de la turba fue interrumpida abruptamente por una entrada de sedimentos (Vessey & Bustin, 2000).

Facies Marina. La facies marina consiste de arenisca cuarzosa de grano fino a medio intercaladas localmente con areniscas calcáreas de color gris claro, limolita calcárea

o rocas calcáreas. Las secuencias granocrecientes son comunes y ocurren en esta área con espesores de hasta seis centímetros. Las areniscas son más cuarzosas y mejor seleccionadas que las de facies de canal y de las facies de desborde. Las principales estructuras sedimentarias son: estratificación cruzada en artesa, planar y laminación flaser.

La geometría de facies marina es de extensos niveles de areniscas cuarzosas con estratificación planar con contactos superiores ondulados y bioturbados comúnmente con faunas marinas a salobres (Foto 17). La ocurrencia total de estas facies es mínima (menos del 1%), y está básicamente restringida a la parte más inferior de la secuencia.

Fotografía 17. Horizonte fosilífero de fauna marina (gasterópodos y bivalvos) en arcillolita.



Fuente: Drummond Ltd

Arcillolitas Plásticas Y Débiles. Las arcillolitas plásticas no fueron definidas como una facies formal pero debido a su importancia fueron definidas en este trabajo como un grupo separado y correlacionable.

Por su plasticidad, estas arcillolitas pueden fácilmente generar superficies de despegue o desplazamiento, las cuales podrían crear deslizamientos en los taludes de los futuros tajos. Este material corresponde a una arcilla consolidada que fue depositada en un ambiente de aguas tranquilas, similares al ambiente de depósito de las “fire-clays”. La principal característica de este material es su alto contenido de sílice y alumina debido, posiblemente, a un proceso de sedimentación dominado por la precipitación química producida por la reacción de los minerales de aguas dulces (proveniente de corrientes fluviales) y el ambiente reductor propio de áreas pantanosas. Se han definido dos tipos de fireclays: flint-clay y plastic-clay. Las arcillas

encontradas en el área de estudio son muy similares a las del segundo tipo. (Foto 18). Existen gran número de coincidencias las cuales sugiere que parte de la plasticidad de las arcillolitas proviene, como se mencionó anteriormente, de propiedades específicas del material, pero también se ha encontrado que su origen se relaciona con la presencia de aguas subterráneas y la deformación estructural.

Fotografía 18. Capa de arcillolita plástica de 1.5' de espesor, a la base de una canal de arenisca de relativa alta permeabilidad.



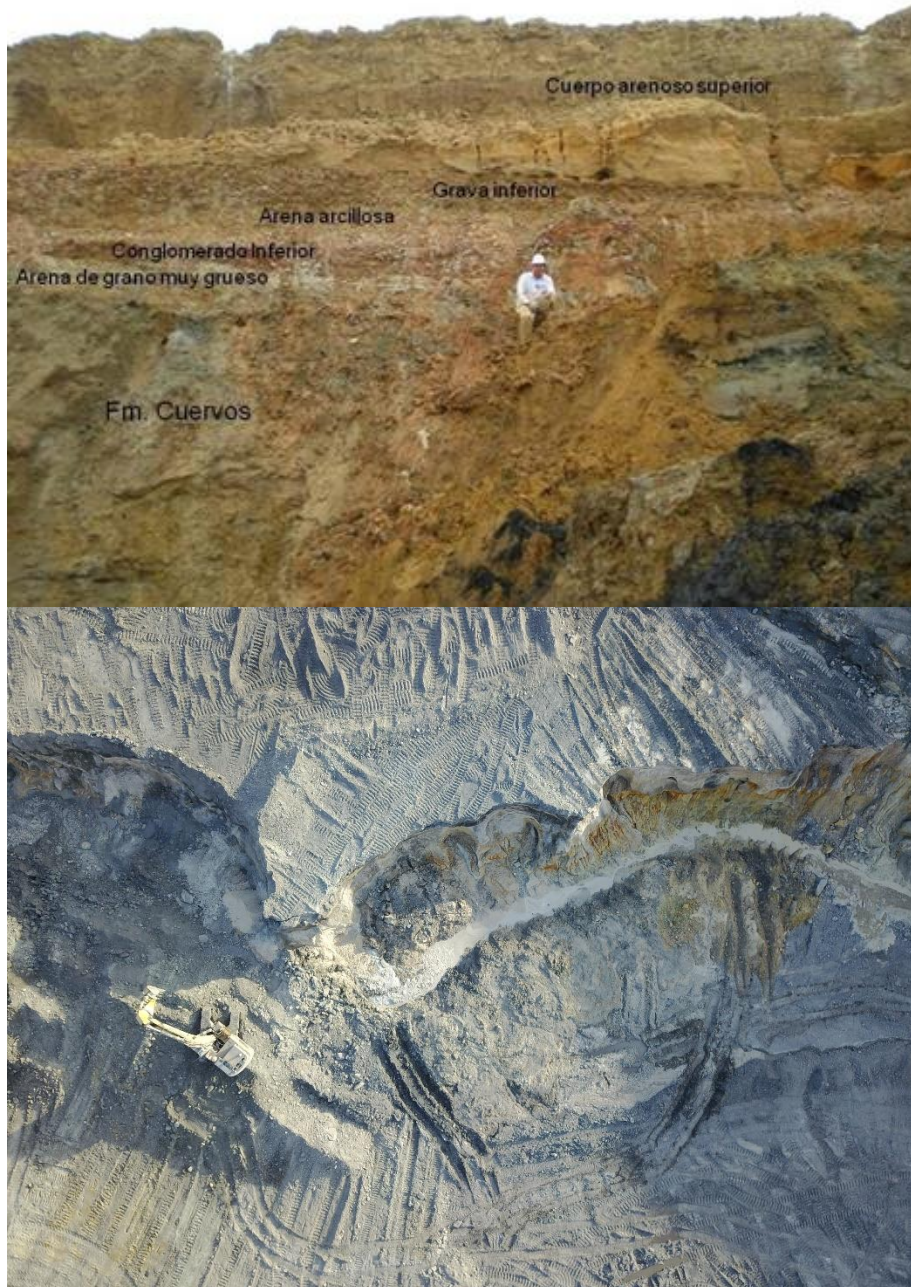
Fuente: Drummond Ltd

Formación Cuesta (N1c). Esta unidad abarca el costado NE y S del bloque la loma y costado NE de la mina. Se presenta como material no consolidado y también como conglomerado de matriz arenosa con “huevos de paloma” de cuarzo de aproximadamente 3 cm de diámetro, areniscas con costras ferruginosas y arcillolitas limosas grisáceas. El contacto con la Formación Los Cuervos es discordante (Ver Anexo A).

Depósitos Aluviales (Qal). Los depósitos cuaternarios de la mina Pribbenow se caracterizan por una granulometría compuesta por arenas, limos y arcillas que generalmente están cubiertas por un nivel de gravas finas de algunos centímetros de espesor. Haciendo parte de la matriz se pueden encontrar cantos rodados. Se encuentran en contacto discordante con la Formación Los Cuervos en la mayoría del

Pit minero (Ver Fotografía 19) En estos depósitos se evidencia presencia de agua la cual se filtra a través del contacto con la Formación infrayacente.

Fotografía 19. Depósito Aluvial. Mina La Loma.



Fuente: Drummond Ltd

4.1.12.5. PRINCIPALES ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS DE LA MINA

La mina La Loma y la concesión del mismo nombre se encuentran afectadas por varios trazos de falla que coinciden con la tendencia regional principal NE-SW,

limitando diferentes bloques o compartimientos estructurales. Estas estructuras consisten principalmente de fallas de cabalgamiento convergencia hacia el W limitando la estructura más notoria en el área, el Sinclinal de La Loma. Las fallas más notorias con esta tendencia son las fallas El Tigre, La Aurora y Botadero 2. Otros sistemas de fallas con tendencia E-W también afectan el área del Pit minero, algunas de tipo normal e inverso y ángulos de falla que oscilan entre los 60° y 75°, entre ellas las fallas Rosario, Norte, Conveyor, San Antonio y La Cruz. Para más detalles ver el Anexo A del presente documento

4.1.12.6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

Dentro del área de estudio se destacan las siguientes estructuras geológicas: (ver figura 33). Para una mejor percepción de las estructuras presentes, se realizaron cortes geológico – estructurales (ver figura 34).

4.1.12.6.1. Pliegues

Sinclinal la Loma. El Sinclinal de La Loma es la estructura central de la cuenca, la unidad portadora de carbones sub-aflora al NE en el cierre de la estructura, en forma de un sinclinal estrecho fallado por su eje. El sinclinal se hace progresivamente más amplio hacia el sur. En general los flancos tienen buzamientos de 20 a 40 grados. El flanco Este es controlado por la Falla del Tigre y el flanco oeste es controlado por el sistema de fallas de La Aurora. En la porción sur de la estructura se une con el Sinclinal El Boquerón formando un amplio sinclinorio.

Sinclinal El Boquerón. Al nivel de la Formación Los Cuervos, el Sinclinal El Boquerón está limitado al Oeste por la Falla del Tigre y al Este por el subafloramiento de la unidad. El cierre Norte es una estructura suave en la que actualmente se desarrolla la operación minera de Mina Pribbenow (Figura 33). El flanco Este de la estructura subaflora por debajo de una cobertera aluvial que en el contrato La Loma varía entre 15 y 50 m de espesor (Figura 34). En este flanco la unidad presenta buzamientos en el rango de 5 a más de 10 grados. Los mayores buzamientos de la unidad portadora

están asociados a la zona de deformación de la Falla Norte, en la porción NW de la estructura.

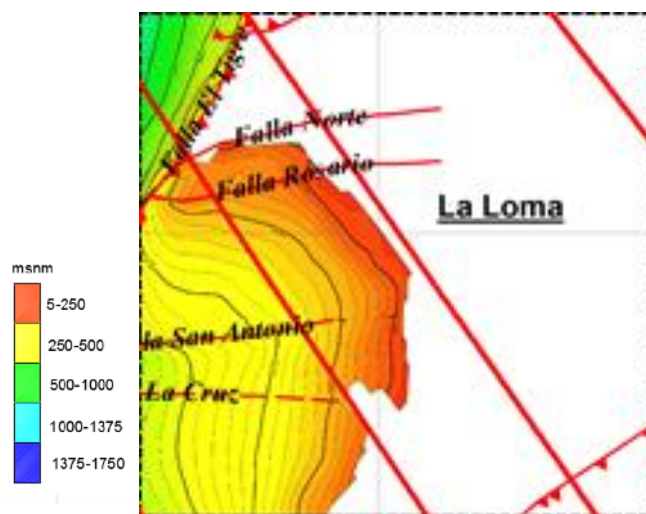
Límites:

Al Oeste con la Falla El Tigre que pone en contacto rocas de la Formación Los Cuervos Miembro Superior que hacen parte del flanco Oriental del Sinclinal de La Loma con rocas del Miembro Medio de la Formación Los Cuervos pertenecientes al sinclinal El Boquerón. Al Sur y Sureste con la Falla Similoa y Falla La Aurora, las que están asociadas a varios pliegues presentes en el área dentro de las áreas de los contratos Rincón Hondo y Similoa.

Características:

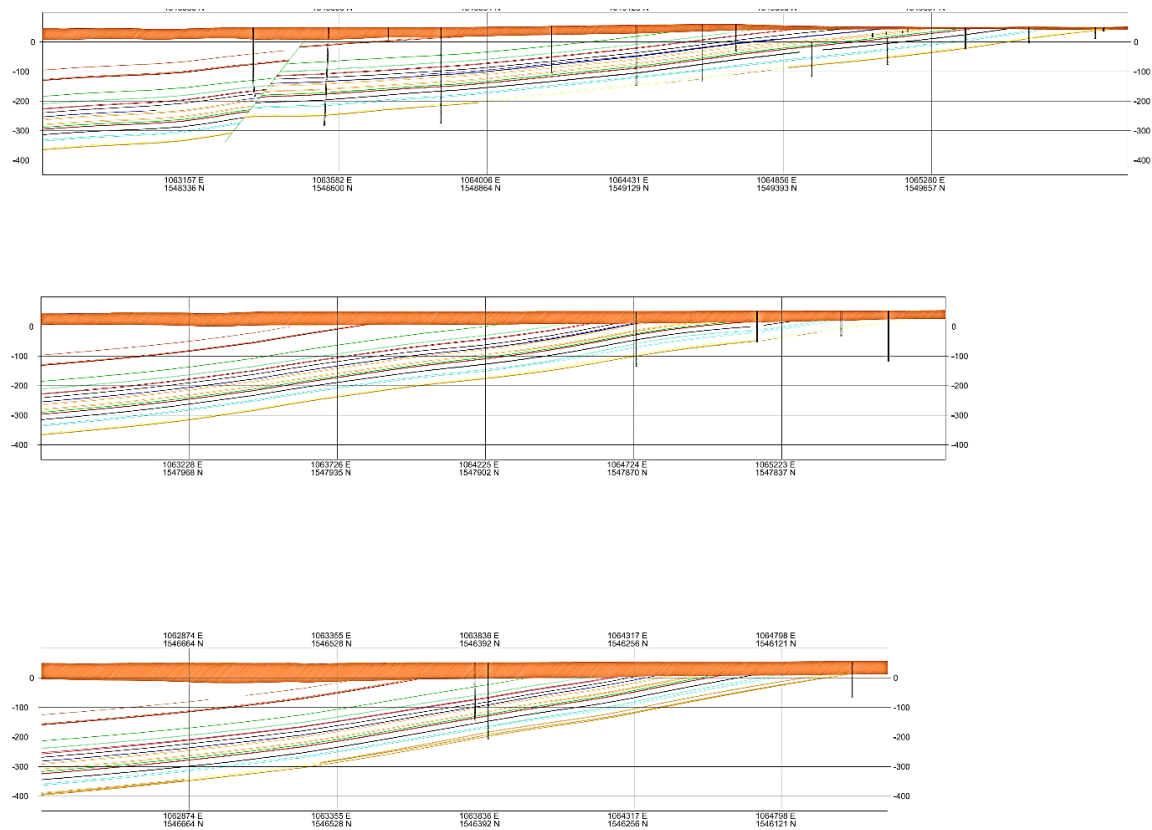
- El rumbo general observado en la parte Norte de la estructura es N35E
- Presenta un amplio cierre al Norte en el que se observan en general bajos ángulos de buzamiento.
- El flanco Oeste de la zona Norte fue erodado, debido al levantamiento ocurrido en esta zona por la acción de la Falla El Tigre. Hacia el Sur este mismo flanco se profundiza y desaparece.
- El cierre Sur del sinclinal El Boquerón presenta una zona tectónicamente compleja.
- En el área de San Antonio-Michoacán ubicada en el flanco Este del sinclinal El Boquerón, no se han observado repliegues menores.

Figura 33. Mapa sismo estructural local Mina Pribbenow.



Fuente: Drummond Ltd

Figura 34. Cortes Geológico-Estructurales Mina Pribbenow Zona Sur Pit.



Fuente: Drummond Ltd

4.1.12.6.2. Fallas

Falla El Tigre. Es una falla inversa con orientación NE-SW e inclinación SE. Desplaza la secuencia más de 152 m colocando en contacto rocas del miembro superior de la Formación Cuervos con el miembro medio de dicha formación. La falla desaparece hacia el sur permitiendo la fusión de los sinclinales de la Loma y El Boquerón.

Falla Botadero 2. Falla inversa con dirección NE-SW e inclinación SE encontrándose al extremo NW del bloque La Loma. Presenta un salto de 45m. Debido a su ubicación no tiene mayor influencia sobre los taludes.

Falla Rosario. Corresponde a la falla intermedia de las 3 principales con sentido E-W que se presentan en el bloque La Loma. Esta falla presenta movimientos variables comportándose en algunos sitios como una falla de tipo normal y en otros como falla inversa. En la zona de explotación minera se presenta como una falla inversa con

inclinación hacia el Norte y un salto estimado de 50 metros. En lo que respecta a la sectorización de la mina, esta falla divide el Pit Norte del Pit Central.

Evidencias

Hay desaparición de mantos en los siguientes pozos: 380C, 209C, 145C, 130C y 133C.

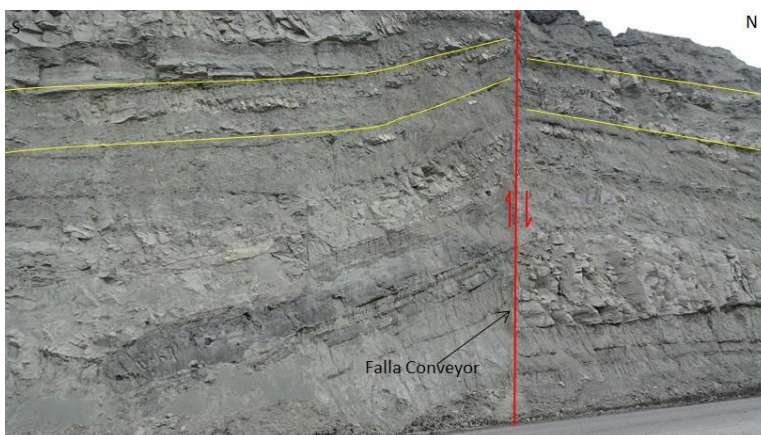
Características

- Falla en tijera
- Su orientación es E-W
- El salto de las capas está en el rango de -26 a 50 metros
- Se estima que esta falla está asociada a la Falla El Tigre y su límite occidental es la terminación contra esta falla

Falla Norte. Esta falla de tipo normal, con inclinación hacia el sur, se encuentra al norte de la falla Rosario. El salto promedio de esta falla es de 50 metros, pero incrementa a medida que se acerca a la Falla del Tigre.

Falla Conveyor. Es una falla tipo normal, secundaria que está limitada por las fallas Rosario y El Tigre. Presenta una dirección E-W con inclinación al sur y salto de 50m. Aflora en el extremo norte del Pit Minero. (Ver Fotografía 20).

Fotografía 20. Falla Conveyor en el sector Norte de la mina Pribbenow desplazando estratos de la Formación Los Cuervos.

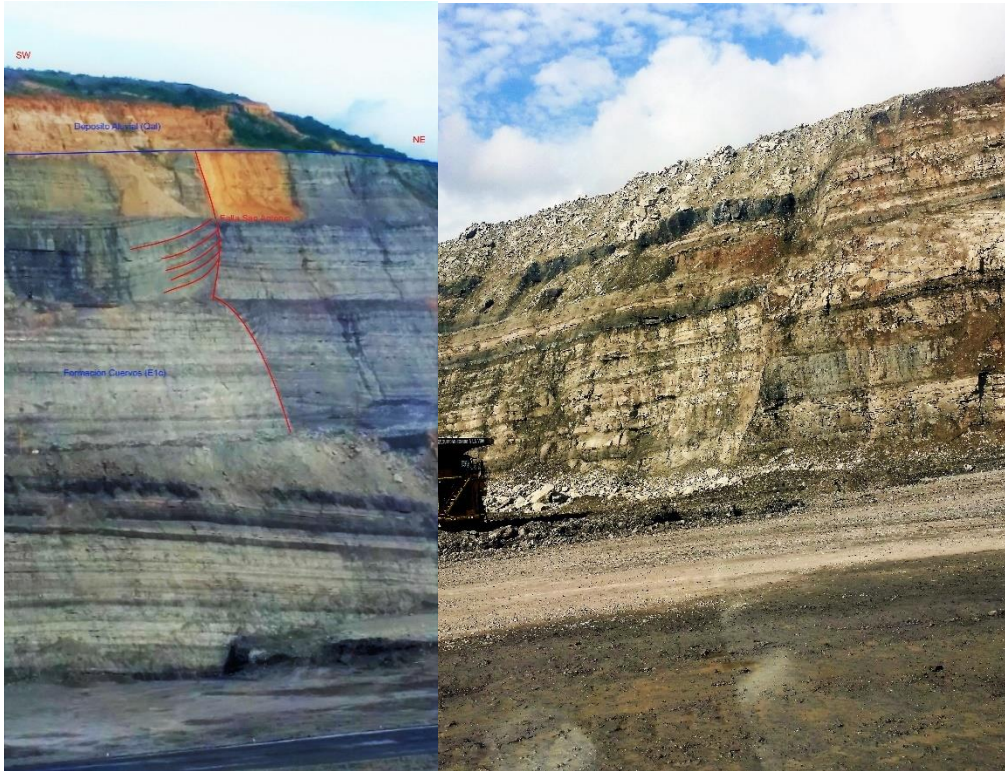


Fuente: Drummond Ltd

Falla San Antonio. Falla con orientación E-W, de carácter normal e inclinación hacia el sur. Sirva como límite del entra el Pit Sur y el Pit Central de la mina, presenta un

salto de máximo 80m siendo mayor en cercanías de la falla el Tigre. El macizo rocoso al sur de esta falla esta plegado aumentando el fracturamiento en una franja de 100m aproximadamente (Ver Fotografía 21).

Fotografía 21. Falla San Antonio cortando la formación Cuervos (E1c) en dirección E-W.



Fuente: Drummond Ltd

Evidencias

- Hay desaparición de mantos en el pozo 0497R.
- El espesor del aluvial aumenta en el bloque sur, que ha sido hundido por acción de la falla.

Características

- Falla normal con componente de rumbo
- Su orientación es E-W
- El salto de las capas está en el rango de 0 a 110 metros
- Al igual que la Falla Rosario, se interpreta que esta falla está asociada a la Falla El Tigre y su límite occidental es la terminación contra esta falla.

Falla La Cruz. Corresponde a la falla inversa más al sur del bloque La Loma presentando una orientación E-W inclinación hacia el norte y un ángulo del plano de falla de 60°. Ver Fotografía 22.

Fotografía 22. Falla La Cruz cortando F. Cuervos, sector sur Mina Pribbenow.



Fuente: Drummond Ltd

Tabla 6. Resumen de las principales características de las fallas en El Boquerón.

FALLA	FIGURA EN ESTE DOCUMENTO	TIPO	VERGENCIA	ANGULO PLANO DE FALLA (°)	SALTO VERTICAL MAXIMO (m)	CARACTERÍSTICAS
Rosario	Figura 1-14	Normal e inversa	S	60	58	Evidencias en los pozos 45C, 133C, 185C, 130C, 142C, 145C, 211C, 391C, 392C, 0410R y 400C
Norte	Figura 1-15	Normal	N	65	190	Evidencias en los pozos 71C, 0343C, 177C, 279C, 0336R, 0349R, 0352R, 0421R, 0359R, 0462R y 0461R
N1	Figura 1-16	Normal	N	70	16	Evidencias en los pozos 0317R, 0319R, 0321R, 1004C y 0350R
Convevor	Figura 1-17	Inversa y normal	N	75	50	Evidencias en los pozos 0416R, 397C, 0401R y 0402C
Botadero	Figura 1-18	Inversa	NW	75	20	Evidencias en los pozos 0475R, 0474R, 0489R, 0373R, 0371R, 0370R y 0369R
San Antonio	Figura 1-19	Normal	N	68	80	Evidencias en los pozos 453C y 0497R
La Cruz	Figura 1-20	Normal e inversa	S	60	60	Evidencias en los pozos 1123C y CP09
El Tigre	Figura 1-21	Inversa	NW	70	2	- Separa los sinclinales de La Loma y El Boquerón. - Las sucesiones estratigráficas a ambos lados de la falla son diferentes: en el lado Oeste de la falla subaflojan rocas del miembro superior de la Formación Los Cuervos (Tpc3), en tanto que al lado Este, cabalgando sobre las anteriores, subaflojan rocas del miembro medio de la formación Los Cuervos o UPC (Tpc2). - Se observa en las líneas sísmicas CV17, CR-88-1440, CV15, CR-88-1400. - Desaparece hacia el Sur permitiendo la fusión de los sinclinales de La Loma y El Boquerón

Fuente: Drummond Ltd

4.1.13. GEOTECNIA

4.1.13.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En el presente capítulo se procederán a describir los criterios y aspectos tenidos en cuenta para la caracterización de los materiales en la zona de estudio (i.e. evaluación de sus propiedades de resistencia). Así mismo, se detallarán el mecanismo de falla considerado y el método de análisis empleado.

Con respecto a los materiales térreos presentes en la zona de explotación minera, es posible observar que sobre la superficie se encuentra una capa de material aluvial (depósito cuaternario) de un espesor importante (20-50 m), la cual suprayace la denominada formación Los Cuervos que es en donde se encuentra el mineral de interés económico. La formación los Cuervos está conformada por rocas de tipo sedimentario destacándose la presencia de arcillolitas, areniscas, limolitas y carbón. Al respecto y según la información consultada, aproximadamente el 92% de la secuencia está conformada por materiales que no presentan interés económico alguno, mientras que el restante 8% corresponde a los mantos de carbón. De este 92% de materiales, 91% son rocas divididas de la siguiente manera: las arcillolitas constituyen aproximadamente el 49%, mientras que un 32% corresponde a areniscas y un 10% son limolitas. El restante 1% lo conforman una serie de capas de arcilla de baja resistencia.

Finalmente, un último material a considerar y en que haremos énfasis para este proyecto, es aquel que se obtiene como resultado de las actividades de voladura necesarias para la extracción del carbón. Dicho material es comúnmente denominado “Estéril” y se dispone en “Escombreras”. Como principal característica de estos estériles se puede mencionar su gran heterogeneidad en términos de tamaño de partículas y componentes, ya que en esencia son la combinación de todos los materiales presentes en la zona de estudio a excepción del carbón. Esta heterogeneidad hace que la determinación de sus propiedades de interés geotécnico mediante ensayos de laboratorio sea una tarea bastante compleja. La forma como están dispuestos estos materiales se puede observar en los perfiles geológicos mostrados en el Anexo A – Geología, del presente documento.

4.1.13.2. CRITERIOS DE FALLA

Un criterio de falla se puede definir como una expresión matemática con la que se pretende representar el comportamiento de un material cuando es sometido a esfuerzos, buscando predecir en qué condiciones se presentará la ruptura del mismo. Debido a la naturaleza heterogénea de los materiales térreos, algunos de los criterios de falla empleados son de carácter empírico, obtenidos a partir de una gran cantidad de ensayos de laboratorio y de experiencias acumuladas, tal es el caso de los macizos rocosos, así mismo existen otros criterios de falla que obedecen a modelos matemáticos de amplia aceptación; tal es el caso del criterio de falla de Mohr-Coulomb. Un criterio de falla se da generalmente en términos de esfuerzos dada su facilidad para ser medidos.

Para la realización de este proyecto de estudio geotécnico de la escombrera zona sur mina Pribbenow se utilizó el siguiente criterio de falla de acuerdo con el material estudiado:

CRITERIO DE MOHR-COULOMB – SUELOS

Bastante utilizado dada su simplicidad tanto en mecánica de rocas como en mecánica de suelos. En este criterio de falla la resistencia a cortante del material a lo largo de un plano está dada mediante la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante en un plano dado

σ_n = esfuerzo normal al plano analizado

c = Cohesión

ϕ = ángulo de fricción interna

Si se analiza para un ángulo $\theta = 45 + \phi/2$, el cual corresponde a lo que se considera en la literatura el plano de falla, este criterio expresado en términos de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \tan \phi}{1 - \tan \phi} \right) + 2c \left(\frac{\cos \phi}{1 - \tan \phi} \right)$$

4.1.13.3. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS.

En este apartado se han incluido los mantos de arcilla presentes en la secuencia estratigráfica de la formación Los Cuervos, además los “escombros” (spoils) producto de la operación de extracción minera.

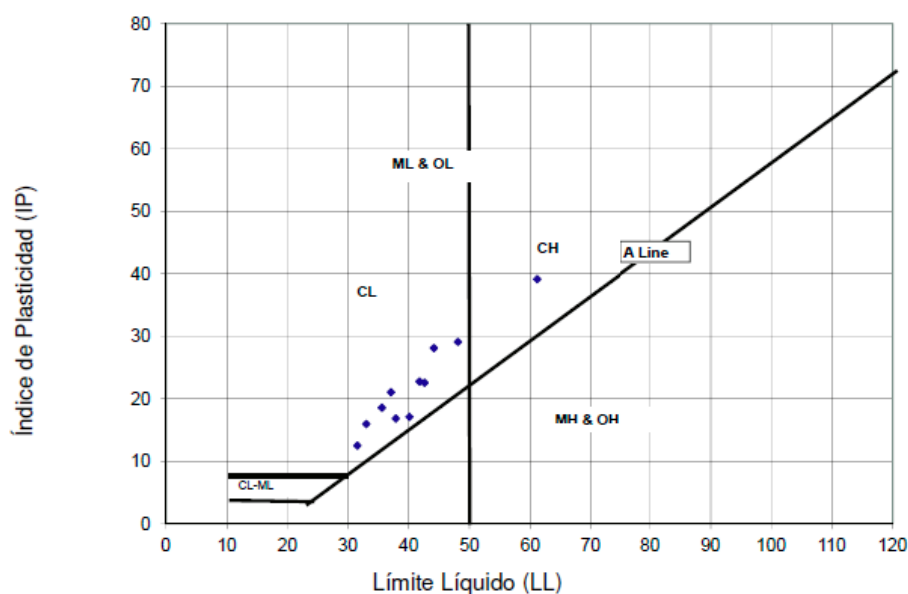
Mantos de arcilla. Dentro de la sucesión estratigráfica presente en la zona de estudio se encuentran una serie de capas de material arcilloso muy blando las cuales se encuentran generalmente en contacto con los mantos de carbón. Dadas sus características de plasticidad y de resistencia este material se considera como un suelo.

Las propiedades de este material se obtuvieron a partir de los ensayos realizados por la firma Call & Nicholas, los cuales consistieron en pruebas de corte directo, límites de Atterberg y humedad natural.

Con respecto al criterio de falla utilizado para la determinación de las propiedades de resistencia se recurrió a la formulación de Mohr Coulomb explicada anteriormente.

A partir de los ensayos de laboratorio se pudo determinar que la arcilla presenta un peso unitario del orden de 17 kN/m³, límite líquido variando entre el 30 y el 50% y un límite plástico con un rango entre el 12% y el 30% lo que clasifica el material como una arcilla de baja plasticidad (CL), tal y como se observa en la Figura 34.

Figura 35. Clasificación manto de arcilla.



Fuente: Drummond Ltd

En cuanto a sus parámetros de resistencia, obtenidos a partir de corte directo, éstos muestran que el ángulo de fricción (ϕ) puede variar entre 7° y 19° con un valor promedio de 13° mientras que la cohesión varía entre 9 kPa y 60 kPa con un promedio de 19 kPa valores que son bastante cercanos a los reportados en el anterior estudio geotécnico efectuado por la firma Call & Nicholas en 2001. Un resumen de los resultados de las pruebas de corte directo efectuadas sobre las muestras de los mantos de arcilla se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 7. Resultados de laboratorio mantos de arcilla (ensayo de corte directo).

Muestra	$\phi(^\circ)$	c(kPa)
1 (Valor pico)	19.36	15.10
2 (Valor pico)	11.05	60.05
3 (Valor pico)	13.28	25.86
4 (Valor pico)	19.01	25.58
5 (Valor pico)	10.69	13.38
6 (Valor pico)	13.09	23.37
7 (Valor pico)	21.01	11.93
1 (Valor residual)	10.39	15.93
2 (Valor residual)	9.99	14.55
3 (Valor residual)	9.11	24.41
4 (Valor residual)	15.04	28.27
5 (Valor residual)	7.30	9.38
6 (Valor residual)	11.83	15.51
7 (Valor residual)	15.86	14.75

Escombros (spoils). Este material es el resultado del proceso de voladura necesaria para la extracción del mineral de carbón, en este sentido es de esperar que su principal característica sea la heterogeneidad en términos de componentes, tamaño de partículas (granulometría), densidad y resistencia. Así mismo, de acuerdo con lo observado en la visita de campo, se puede afirmar que el material de escombros presenta las siguientes características generales:

- El componente arcilloso dentro del material es muy importante tanto como agente condicionante y desencadenante debido en gran medida a la proporción de arcillolitas con respecto a los otros tipos de roca y al grado de “pulverización” que alcanzan estas luego de la voladura. Actúa como agente condicionante cuando se mezcla en las cantidades y relaciones adecuadas

debido a que este interviene como un cementante reduciendo así el volumen de vacíos, en cuanto a lo desencadenante se ve reflejado al momento de sufrir una sobre saturación y al no estar mezclado en las cantidades y relaciones adecuadas. Así mismo, este componente se ve manifestado al humedecer el material, en donde se observa rasgos propios de suelos arcillosos como la plasticidad.

- De acuerdo con los procedimientos de conformación de escombreras observados en el lugar de estudio, en donde se sigue el denominado “Descargue a desnivel” se encuentra que el material dispuesto conforma ángulos que varían entre los 35° y los 37° . Al respecto cabe mencionar que las cargas y vibraciones inducidas por los equipos pesados y voladuras durante el proceso de conformación de las escombreras traen como consecuencia una segregación de partículas provocando que los materiales de mayor tamaño y peso se tiendan a situar hacia la parte inferior de cada capa, generando que los taludes de estos materiales estén conformados por una sucesión de materiales gruesos y finos.
- A pesar del valor de ángulo de reposo reportado, se considera que, dada la importante proporción de material fino, el asignar un valor de ángulo de fricción mayor de 30° le otorgaría un carácter primordialmente granular a dicho material, lo cual no sería correcto.
- se observaron procesos de inestabilidad en los taludes conformados, los cuales alcanzan una altura de banco del orden de los 20 m, también conocida como retrollenado, por lo que efectuar un análisis de retrocálculo resultaría inapropiado ya que no se conoce una superficie de falla definida a la que se le pueda asignar un valor de factor de seguridad cercano a 1.0 como es la práctica actual.
- En vista de las anteriores consideraciones y ante la mencionada dificultad para efectuar pruebas o ensayos sobre este tipo de material, para efectos del presente estudio se decidió adoptar un valor característico de ángulo de

fricción de 25° y una cohesión de 40 kPa los cuales son similares a lo reportado en el informe presentado por Call & Nicholas (2001) y se encuentran dentro de los rangos reportados en literatura entre otros por Williams, et al.(1991), Ulusay et.al (1995) y Simmon & McManus, (2004) quienes efectuaron análisis estadísticos en una gran cantidad de muestras tomadas sobre escombros procedentes de diferentes explotaciones carboníferas con secuencias estratigráficas compuestas por una sucesión de arcillolitas y areniscas principalmente.

4.1.13.4. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS ADOPTADOS.

Establecidos los parámetros geotécnicos y la distribución de probabilidad de cada uno de ellos, en las siguientes tablas se muestran los valores utilizados en el análisis de estabilidad para el mecanismo de falla considerado. Al respecto, en la Tabla 8 se muestran los parámetros usados para evaluar la falla general por corte (circular y en bloque).

Tabla 8. Parámetros geotécnicos adoptados para suelos y roca.

Material	Propiedad	Distribución	Media (μ)	Desv Stand (σ)
Arcillolita	parámetro a	Uniforme	0.505	N.A
	parámetro	Uniforme	0.285	N.A
	parámetro s	Uniforme	0.001	N.A
	σ_{ci} (kPa)	Normal	11600	5380
	γ (kN/m ³)	Normal	22.73	2.38
Limolita	parámetro a	Uniforme	0.505	N.A
	parámetro mb	Uniforme	1.709	N.A
	parámetro s	Uniforme	0.001	N.A
	σ_{ci} (kPa)	Normal	28771	11200
	γ (kN/m ³)	Normal	25.08	0.86
Arenisca	parámetro a	Uniforme	0.505	N.A
	parámetro mb	Uniforme	1.273	N.A
	parámetro s	Uniforme	0.001	N.A
	σ_{ci} (kPa)	Normal	35000	13000
	γ (kN/m ³)	Normal	24.24	1.11
Carbón	parámetro a	Uniforme	0.505	N.A
	parámetro mb	Uniforme	1.021	N.A
	parámetro s	Uniforme	0.001	N.A
	σ_{ci} (kPa)	Normal	23750	10400

	γ (kN/m ³)	Normal	12.26	0.58
Aluvial	Cohesión	Normal	60	12
	ϕ	Normal	32	2
	γ (kN/m ³)	Normal	21	1
Arcilla	Cohesión	Normal	19	5.88
	ϕ (°)	Normal	13	3.43
	γ (kN/m ³)	Normal	20	1
Escombros	Cohesión	Normal	40	10
	ϕ	Normal	25	5
	γ (kN/m ³)	Normal	18	1

Fuente: Drummond Ltd

4.1.13.5. CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS.

En las siguientes secciones se procederá a detallar los criterios tenidos en cuenta para efectuar los análisis de estabilidad en lo relacionado con niveles freáticos, parámetros sísmicos, presión de poros y Geometría y fábrica estructural

Hidrogeotécnica. Para efectos geotécnicos se tienen dos acuíferos: Uno, los depósitos recientes (formación Aluvial) y otro, el macizo rocoso (FM. Cuervos), se han definido como unidad 1 y unidad 2.

Unidad 1. Comprende los depósitos cuaternarios (Qal). Esta unidad de carácter no consolidado de alta porosidad/permeabilidad primaria, lo que le da una gran capacidad para almacenar o dejar pasar el agua subterránea. A pesar de su tamaño de grano altamente variable (lodos, arena y gravas), esta unidad es potencial para la formación de acuíferos libres, principalmente por su carácter no consolidado.

Unidad 2. Comprende las formaciones con estratos reportados de carbón o *shales* carbonosos (Formación La Luna – K2l, Formación Barco – E1b, Formación Los Cuervos E2c). A estas unidades se les asignan características hidráulicas similares dado que: (a) los estratos no carbonosos tienden a ser de grano fino (Limolitas, Arcillolitas o Calizas con porosidad/permeabilidad primarias bajas a muy bajas) o de grano medio (Areniscas cementadas y con matriz fina con porosidad/permeabilidad primarias bajas a muy bajas); y (b) los mantos de carbón y *Shales* carbonosos son impermeables pero, a su vez, dada su fragilidad, poseen una gran permeabilidad

secundaria por fracturamiento. En consecuencia, para una escala regional las rocas de esta unidad poseen conceptualmente una capacidad media para el flujo de aguas subterráneas.

A la escala del modelo hidrogeotécnico (estabilidad de taludes), es pertinente segregar esta unidad así: el carbón generalmente permeable atrapado entre la roca que es generalmente impermeable da como resultado un acuífero semi-confinado compartimentalizado; recargado por el acuífero aluvial suprayacente (unidad hidrogeológica 1). Además, dada la existencia de planos de arcilla plástica en la roca de respaldo y su naturaleza estratificada, la hidráulica de esta unidad exhibe un carácter anisotrópico; en donde la permeabilidad es relativamente mayor en dirección del buzamiento (a lo largo de las fracturas del carbón y la roca) y mucho menor normal al buzamiento (dirección en la cual capas muy impermeables como las arcillas bloquean el flujo del agua). Si la permeabilidad a lo largo del buzamiento es alta y la conectividad es buena en la escala del tajo, se podría tener el potencial de aumento en la presión de poros de pared baja en la medida que la mina se profundice; en contraste, en las paredes altas donde la estratificación no es paralela a la cara del talud, se produce un efecto de red de flujo y una consecuente mitigación de presiones de poro. El gas metano presente en el carbón puede afectar la presión de poro, sin embargo, las formas de esta afectación son difíciles de predecir debido a que el gas es más compresible que el agua.

Presión de poro. La presión de poro es importante en los análisis de estabilidad y particularmente crítica en estabilidad de la pared baja. Las observaciones realizadas en los contratos de concesión mineros La Loma y el Descanso en su sector Norte, muestran que las presiones de poro podrían alcanzar niveles asociados a roca saturada, en algunos sitios de la pared baja. Por otro lado, las paredes altas y aluvial, escombreras y relleno son medios mejor drenados, donde se establece una red de flujo que mitiga sustancialmente las presiones de poro.

Los análisis de estabilidad realizados incluyen la presión de poro en la forma del factor R_u , este factor se define como sigue:

$$R_u = \frac{v}{\gamma h}$$

Donde:

u = presión de poro de agua

γh = esfuerzo vertical total (o presión de sobrecarga)

Valores típicos para el constante R_u en pared baja es: 0.4 (sin tratamiento o saturado), 0.25 (con sistema de despresurización o drenaje normal) y 0.1 (con sistema de despresurización o drenaje agresivo).

R_u se relaciona con la densidad de la roca y del agua para una altura dada. En consecuencia, por ejemplo, una presión de poro contante de 0.4 equivale aproximadamente a un talud en roca en condiciones saturadas similares a las observadas en los contratos de concesión La Loma y el Descanso en su sector Norte. Cabe anotar que el factor R_u probablemente varía a lo largo de las potenciales superficies de falla, por lo que la suposición de un valor único de R_u no es del todo correcta; sin embargo, dado que sólo es posible medir la distribución de la presión de poro durante el avance de la mina; se considera que la suposición de un R_u constante es válida en la medida que se deja siempre del lado conservador.

En los análisis de estabilidad se usan los valores de R_u indicados en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9. Constante de presión de poro R_u Pared Baja.

Rango de buzamiento	Despresurización o drenaje	R_u	Sector contrato de concesión
<10°	No requiere	0.40	Tajos Norte, Central y Sur

Fuente: Drummond Ltd

Tabla 10. Constante de presión de poro R_u otros sectores.

Sector del tajo	R_u
Pared alta	0.20
Aluvial	0.25
Escombreras	0.10
Relleno	0.20

Fuente: Drummond Ltd

Cabe mencionar que el valor R_u para el análisis realizado es 0.10 debido a que se trata de una escombrera ubicada en pared baja, su condición de presión de poros no es constante a lo largo de toda la escombrera.

Nivel Freático. Con respecto al nivel de agua subterránea no se tiene información de su ubicación exacta, sin embargo, se puede afirmar que en desarrollo de la visita de campo no se identificaron puntos en la cara de la escombrera en donde estuviera fluyendo líquido, así mismo, se debe tener en cuenta el efecto de abatimiento que la explotación minera ejerce, por lo que se puede decir:

- Bajo condiciones normales no se observa que el agua fluya hacia la cara de la escombrera, sin embargo, para efectos de análisis de estabilidad se ha considerado que ésta sale a superficie en la pata del talud, siguiendo una línea superior de flujo similar a la planteada por Hoek & Bray (1981) y reproducida por Duncan & Wright (2005) en la que la fuente superficial de agua se encuentra localizada a 8 veces la altura del talud.
- Para condiciones extremas de agua y dadas las características de los materiales presentes en la columna estratigráfica se ha asumido una condición en la cual el agua brota en la cara del talud en un punto localizado aproximadamente en la mitad de su altura la cual según Hoek & Bray (1981) correspondería a una condición en la que la fuente superficial de agua se encuentra a 2 veces la altura del talud.

Análisis de sismo. Con respecto al análisis sísmico, se siguió el procedimiento normalmente aceptado denominado análisis pseudoestático, el cual consiste en simular los efectos del temblor mediante la aplicación de una carga horizontal y vertical. Esta carga adicional se aplica por medio de un coeficiente de aceleración, el cual corresponde a una fracción de la aceleración de la gravedad. Para el caso del estudio se siguieron los lineamientos que al respecto establece la legislación colombiana a través de su norma sismo resistente NSR-10.

Para la estimación de estos coeficientes se tuvo en cuenta lo consignado en el título H de la mencionada norma, según el cual para análisis pseudoestáticos el coeficiente de aceleración horizontal k_h a utilizar es igual a:

$$k_h = KST * A_a * F_a * I$$

Siendo:

KST : Coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes

Aa : Coeficiente de aceleración sísmico de diseño correspondiente a una probabilidad de excedencia del 10% en un lapso de 50 años arrojando como resultado un periodo de retorno de 475 años

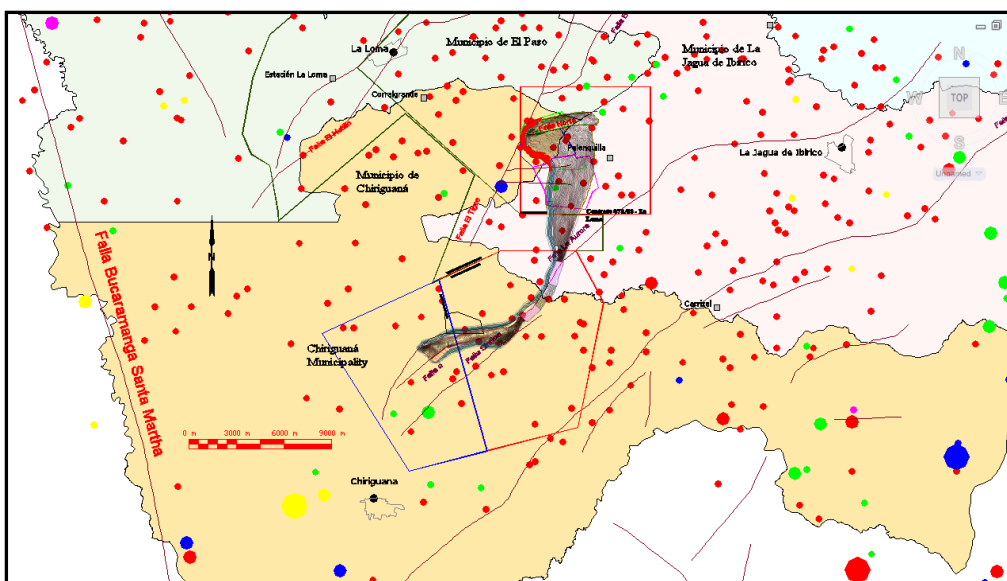
Fa = Factor de amplificación que tiene en cuenta los efectos de sitio en el rango de periodos cortos.

I = Coeficiente de Importancia

Con respecto al valor de KST , la norma NSR-10 establece que para macizos rocosos con $RQD > 50\%$ se debe adoptar un valor igual a 1.0 mientras que para suelos (escombros y aluvial en el caso de la mina La Loma) el valor adoptar sería igual a 0.8. Por su parte, el mismo documento establece que para la zona en donde se encuentran localizada la mina el valor del coeficiente de aceleración sísmico (Aa) a adoptar debe ser igual a 0.1

Debido a la ubicación geográfica de la mina La Loma y según lo estipulado en la normativa colombiana ver figura 36, el Factor de Amplificación (Fa) para los taludes de la pared alta que están excavados en roca es igual a 1.0 mientras que para los taludes de las escombreras se ha considerado que las mismas corresponden a un suelo de tipo C donde el factor de amplificación (Fa) es 1.2.

Figura 36. mapa Actividad sísmica local.



Fuente: Drummond Ltd

En lo referente al coeficiente de importancia (I) se considera igual a 1,0 ya que el Pit donde se encuentra el área en estudio, en la etapa de operación, se incluye dentro del Grupo I, correspondiente a estructuras de ocupación normal (NSR-10, 2010).

De lo anterior se obtiene que el coeficiente k_h a usar dentro de los análisis pseudoestáticos tanto para los taludes en escombros como para los taludes en suelo será igual a 0,08.

Con respecto a la componente de aceleración vertical (k_v) se considera que en la zona donde se encuentra localizada la mina La Loma no se cuenta con la presencia de fuentes sismogénicas cercanas (<25 km), por lo que conforme a lo expresado en la norma sismo resistente colombiana se decidió no incluirla dentro de los análisis llevados a cabo.

Tabla 11. Valores de K_{st}/a_{max} mínimos para análisis pseudoestático de taludes.*

Material	K_{st}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: Norma sismo Resistente NSR-10

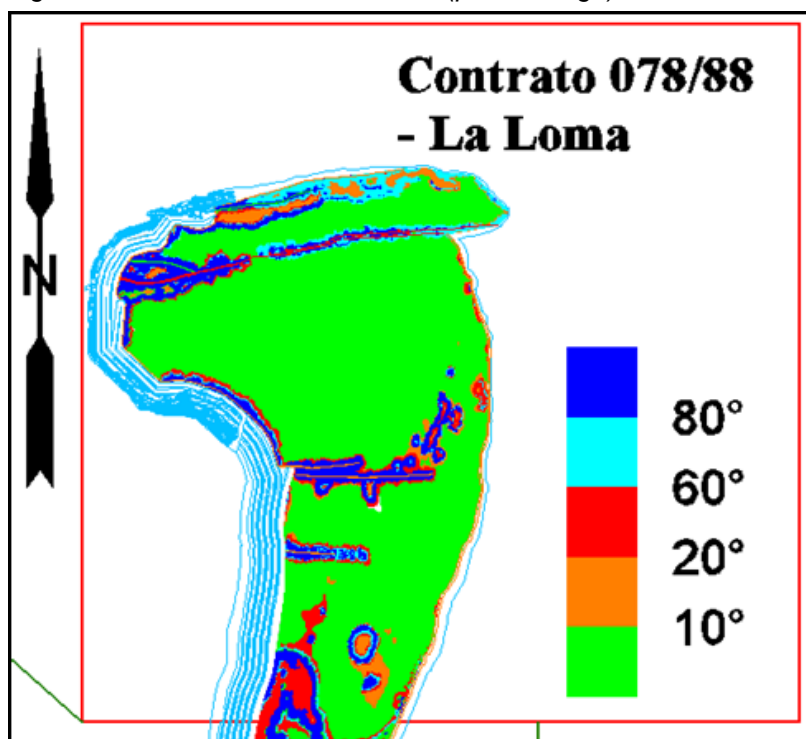
Geometría y fábrica estructural. La estratificación es la discontinuidad más persistente de la formación, representa aproximadamente el 92% de la fábrica estructural del macizo rocoso. Debido a fuerzas tectónicas y consecuente fallamiento, la geometría de la estratificación originalmente horizontal presenta múltiples deformaciones produciendo áreas con buzamientos desde sub-horizontales (<10°) hasta buzamientos muy empinados (hasta de 60° o más) pasando por zonas intermedias donde gradualmente se pasa entre estos dos extremos.

Desde el punto de vista geotécnico esta característica del medio implica el uso de un modelo constitutivo que considere la anisotropía.

El manto Borrego es la base de la unidad portadora de carbones, en la Figura 37 se puede apreciar el rango de variación del buzamiento de estratificación a lo largo de

cada contrato. Con base en la experiencia de Drummond Ltd. y de terceros, es posible clasificar la pared baja de acuerdo a su geometría y asociar a cada categoría algunas recomendaciones generales mínimas que deben ser observadas y evaluadas en conjunto con otros aspectos geotécnicos que se tienen en cuenta para dicho análisis, en el caso del área donde se ubica la escombrera esta se le asigna un Angulo de buzamiento $<10^\circ$ zona de color verde.

Figura 37. Buzamiento estratificación (piso Borrego).



Fuente: Drummond Ltd

Tabla 12. Estabilidad de pared baja según magnitud de buzamiento.

Buzamiento de pared baja	Descripción	Relleno simultáneo	Voladura de rugosidad y drenaje	Despresurización o drenaje	Bermas
$<10^\circ$	Estable	Posible	Indicada si relleno y previo a su instalación.	No requiere	No requiere
$10^\circ - 20^\circ$	Marginalmente Estable	No recomendado, pero posible previo estudio de caso y medidas de	No recomendado, pero posible si se ejecuta de forma sistemática y con un diseño de voladura	Sistema de despresurización o drenaje o drenaje normal	No requiere

Buzamiento de pared baja	Descripción	Relleno simultáneo	Voladura de rugosidad y drenaje	Despresurización o drenaje	Bermas
		estabilización geotécnicas	acorde a la amenaza		
20° - 60°	Inestable	No es posible	No recomendado	Sistema de despresurización o drenaje o drenaje agresivo	Recomendado. Se debe evaluar en función de la calidad de la roca.
60° - 80°	Marginalmente Estable	N/A	No es posible	Drenes subhorizontales	Posible para otros mecanismos de falla (ej. vuelco)
> 80°	Estable	N/A	No es posible		

Fuente: Drummond Ltd

4.1.13.6. TIPO DE ANÁLISIS Y MECANISMOS DE FALLA

En todos los análisis de estabilidad presentados, se usa el método de equilibrio límite para determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla del talud en roca, relleno, escombrera y aluvial. El análisis de estabilidad se realiza en las secciones más críticas representativas de cada parte del tajo (peor escenario).

Todos los taludes diseñados cumplen el criterio de seguridad establecido en la Tabla 13; en los casos analizados se garantiza la estabilidad global ante todos los potenciales mecanismos de falla posibles en el área del contrato.

Tabla 13. Factor de seguridad mínimo y probabilidad de falla máxima para taludes.

Caso	FS mínimo	Probabilidad de falla máxima (%)
Estático con agua subterránea normal.	1.20 ⁽¹⁾	20.0
Seudo-estático con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño.	1.05 ⁽²⁾	

⁽¹⁾ *Geotechnical Considerations in Open Pit Mines – Guidelines, 1999. Department of Minerals and Energy, Western Australia. MOSHAB Mines Occupational Safety and Health Advisory Board.*

⁽²⁾ *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Tabla H.2.4-1.*

El análisis de estabilidad se desarrolla por medio del método analítico de equilibrio límite bidimensional, según el software Slide de Rocscience y el método de Bichop y Spencer modificado. Se realizan análisis de estabilidad estáticos y pseudo-estáticos, evaluando el factor de seguridad y la probabilidad de falla, usando el método de muestreo de Monte-Carlo, distribución normal para los parámetros geotécnicos y distribución exponencial para la amenaza sísmica.

La variabilidad de los materiales se calcula estadísticamente como la desviación estándar de todos los resultados de análisis de laboratorio para cada unidad geotécnica tipo, ver Tabla 14. En general la Arenisca y la Limolita exhiben una respuesta geomecánica similar, por lo que se agrupan en la unidad geotécnica o estratigráfica tipo Rocas Duras. De otro lado, la arcillolita es el principal miembro de la unidad geotécnica o estratigráfica tipo Rocas Blandas.

Tabla 14. Desviación estándar promedio materiales.

Unidad geotécnica o estratigráfica	Desviación estándar típica
Carbón	49%
Rocas duras	31%
Rocas blandas	66%
Anisotropía	16%
Inertes	10%
Aluvial	10%

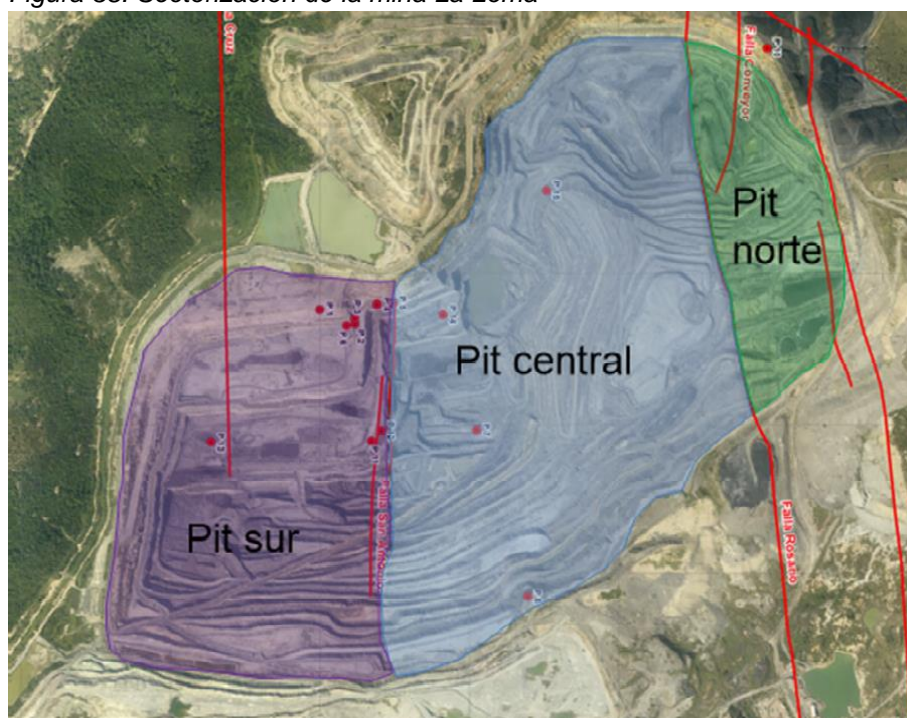
Fuente: Drummond Ltd

4.1.13.7. ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE TALUDES Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

Para llevar a cabo el análisis de estabilidad de la escombrera en la zona sur mina Pribbenow, se ha tenido en cuenta la división que ha hecho la empresa Drummond Ltd, según la cual el Pit minero se encuentra dividido en tres sectores: Pit Norte, Pit Central y Pit Sur. Sectorización se mencionará y enfatizará en el Marco Geológico Local, el cual se basa en los lineamientos de las Fallas Rosario y San Antonio. Al respecto se recuerda que el Pit Norte corresponde a la zona de la mina limitada por la pared final y la falla Rosario, por su parte el Pit Central se encuentra localizado en la zona comprendida entre la falla Rosario y la Falla San Antonio, mientras que el

sector restante y en el cual se realizara y se enfocara todo el proyecto hace referencia a la zona de explotación localizada al sur de la falla San Antonio. A partir de la visita efectuada, se pudo verificar que en la actualidad las labores de minado se concentran casi que exclusivamente hacia el sector sur de la mina, mientras que en los otros sectores se están iniciando las labores de reconfiguración de taludes ya que la actividad extractiva está llegando a su fin. En la Figura 38 se muestra gráficamente lo anteriormente expresado.

Figura 38. Sectorización de la mina La Loma



Fuente: Drummond Ltd

En el área de estudio ubicada exactamente en la zona sur, se definieron secciones características y/o críticas buscando cubrirla en toda su extensión, de tal manera que las mismas reflejen las características de la excavación de la pared baja y la conformación actual de la escombrera, para de esta manera poder efectuar una evaluación integral de las condiciones de estabilidad, tal y como lo exige la Agencia Nacional de Licencias Ambientales.

Una vez definidas estas secciones y haciendo uso tanto de la información contenida en los registros de perforación como de la adquirida durante la visita de campo, se construyeron las secciones geológicas, las cuales constituyen la base fundamental de los análisis de estabilidad.

4.1.13.8. CRITERIO PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA.

Con respecto a la evaluación de la amenaza, se han seguido los lineamientos establecidos por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) entidad que clasifica los niveles de amenaza en alto, medio y bajo basándose en los resultados de los análisis de estabilidad. En esta metodología de acuerdo con el Factor de seguridad obtenido, se otorga un nivel de amenaza en particular. En la siguiente tabla se presentan dichos criterios.

Tabla 15. Criterios de análisis para la evaluación de la amenaza. ANLA (2015).

Grado de amenaza	Condiciones normales FS	Condiciones extremas (50 años) FS
Amenaza Baja	> 1.9	> 1.9
Amenaza Media	1.2 - 1.9	1.0 – 1.9
Amenaza Alta	< 1.2	< 1.0

Fuente: ANLA

Como se puede observar, existe un intervalo de factor de seguridad no considerado para el análisis de condiciones extremas entre los grados de amenaza media y baja, en vista de lo cual para efectos del presente estudio se adoptó que, para las condiciones extremas de análisis, el grado de amenaza media se dará para un intervalo de factor de seguridad entre 1.0 y 1.9.

4.1.13.9. ESCENARIOS DE ANÁLISIS

Según lo establecido en el documento emitido por la Agencia de licencias ambientales: denominado “Términos de referencia - Modificación del plan de manejo ambiental del proyecto La Loma (LAM0027) y la licencia ambiental del proyecto El Descanso y Rincón Hondo (LAM3271) Drummond Ltd” (ANLA, 2015), los análisis se deben efectuar para las condiciones normales y extremas de agua y sismo, las cuales deben estar en concordancia con la normatividad vigente.

En vista de lo anterior y considerando tanto lo mencionado en los numerales 4.1.1 y 4.1.2 como lo dispuesto en la NSR-10 en lo referente a análisis de estabilidad de taludes, en la Tabla 16 se presentan las características de cada uno de los escenarios considerados.

Tabla 16. Escenarios de análisis.

ESCENARIO	Agua	Sismo
Normal	Nivel de agua	No aplica
Extraordinario	Nivel de agua	$k_h = A_a^{**}$ y Nivel de agua

* $A_a = 0.1$ (Coeficiente sísmico de diseño para un periodo de retorno de 475 años)

Fuente: ANLA

4.1.13.10. MECANISMOS DE FALLA

Con respecto a los mecanismos de falla analizados en la pared baja de la mina la Loma se debe tener en cuenta las evidencias que en ese sentido aporta la excavación misma, la cual según lo observado en la visita de campo presenta un buen comportamiento a pesar de que sus taludes en escombrera se encuentran en diseñados en dirección del buzamiento y a su vez sometidos a los efectos de la voladura y del intemperismo. Antecedentes reportados en la misma zona de estudio se han evidenciado fallas circulares a fallas compuestas debido al tipo de material con los que se encuentran conformados los taludes.

4.1.13.11. ANALISIS DE ESTABILIDAD

De acuerdo con las 5 secciones geológicas que se le efectuaron los análisis de estabilidad los resultados de las mismas serán explicados a continuación. Ver figura 39.

Como una muestra de los cálculos realizados, en las Figuras 39 a 58 se presentan los resultados obtenidos mediante el programa Slide®, para los análisis de estabilidad efectuados en el área crítica de la escombrera (Sección 1, 2, 3, 4, 5). Como se puede observar, al evaluar superficies de falla circulares y compuestas se obtienen en algunos casos factores de seguridad que se encuentran en el intervalo de amenaza baja y media según los criterios establecidos por la ANLA tanto para la condición “Normal” como para los eventos “Extremos”.

En la Tabla 17 se presenta los resultados de cálculos efectuados tanto en términos de factores de seguridad como de probabilidad de falla (valor entre paréntesis), de los análisis de estabilidad de taludes.

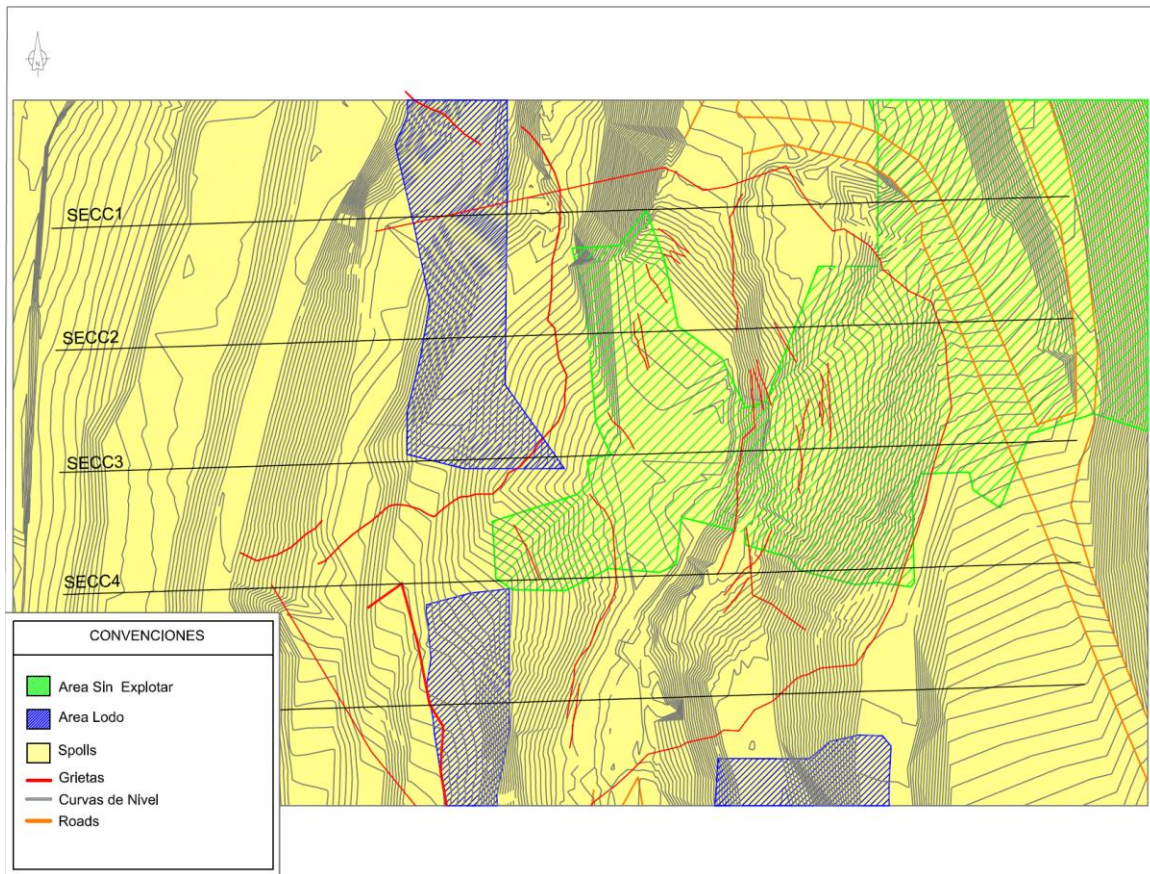


Figura 39. Mapa localización secciones.

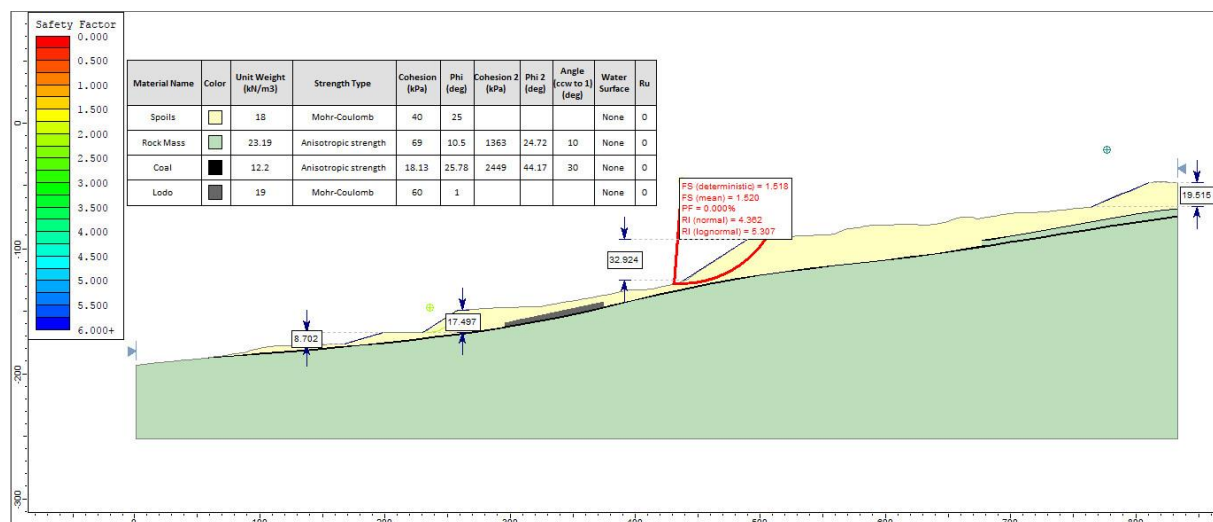


Figura 40. Secc1. Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal.

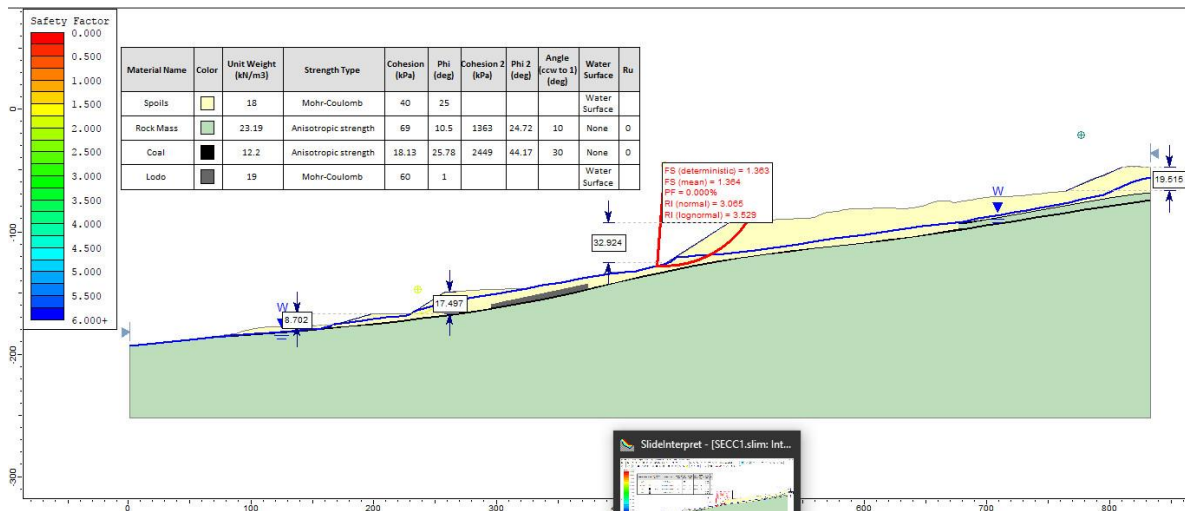


Figura 41. Secc1.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

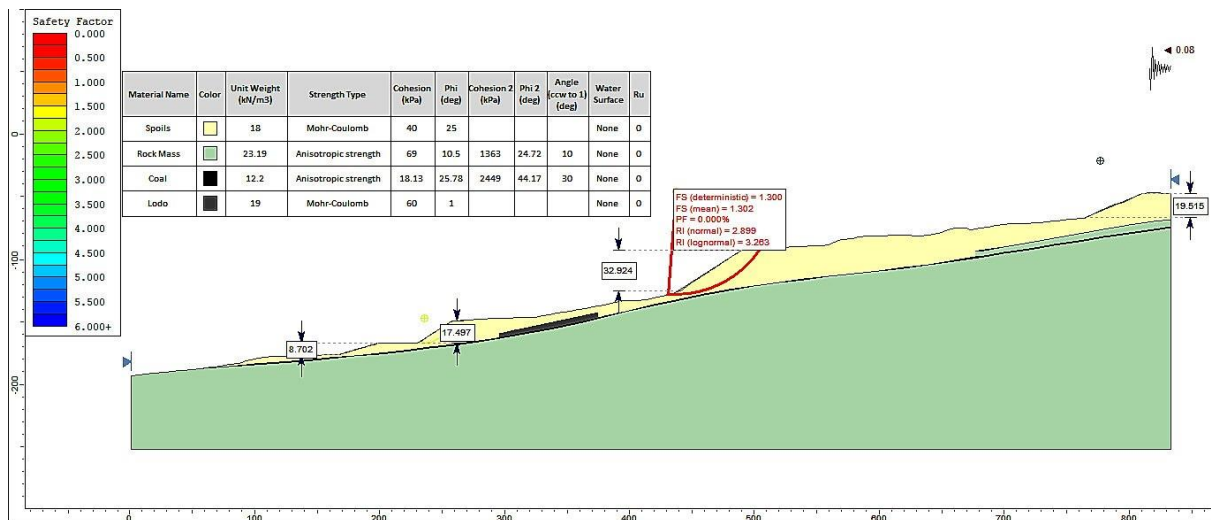


Figura 42. Secc1.Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición pseudoestico.

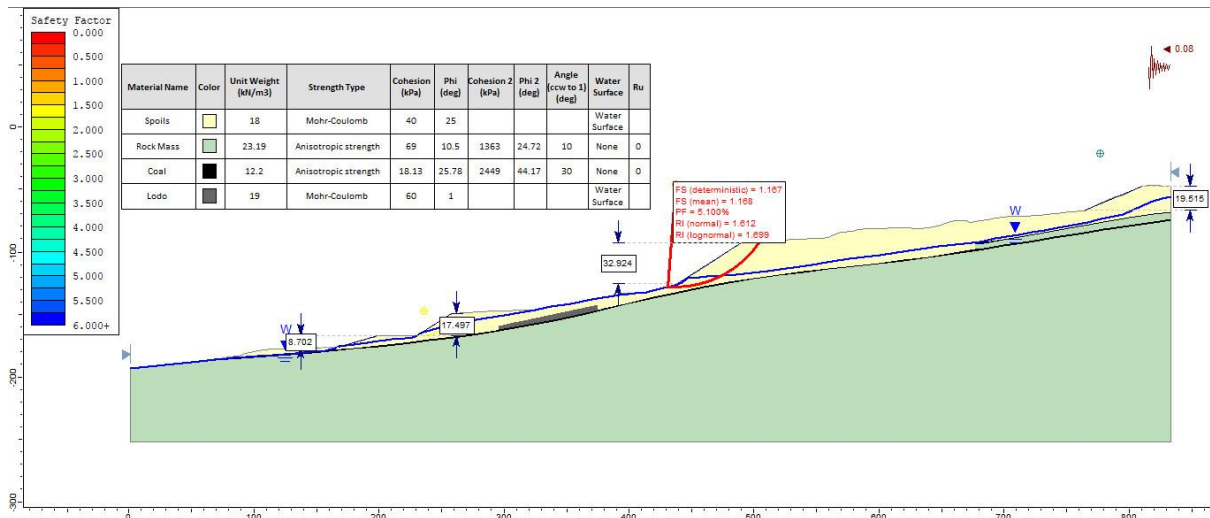


Figura 43. Secc1. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición Pseudoestático.

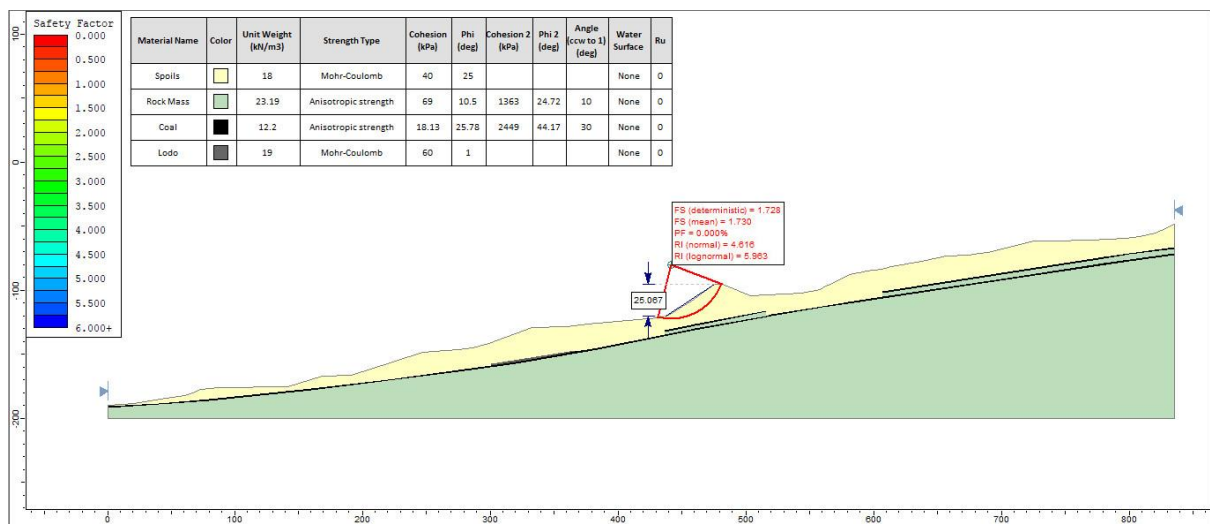


Figura 44. Secc2. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

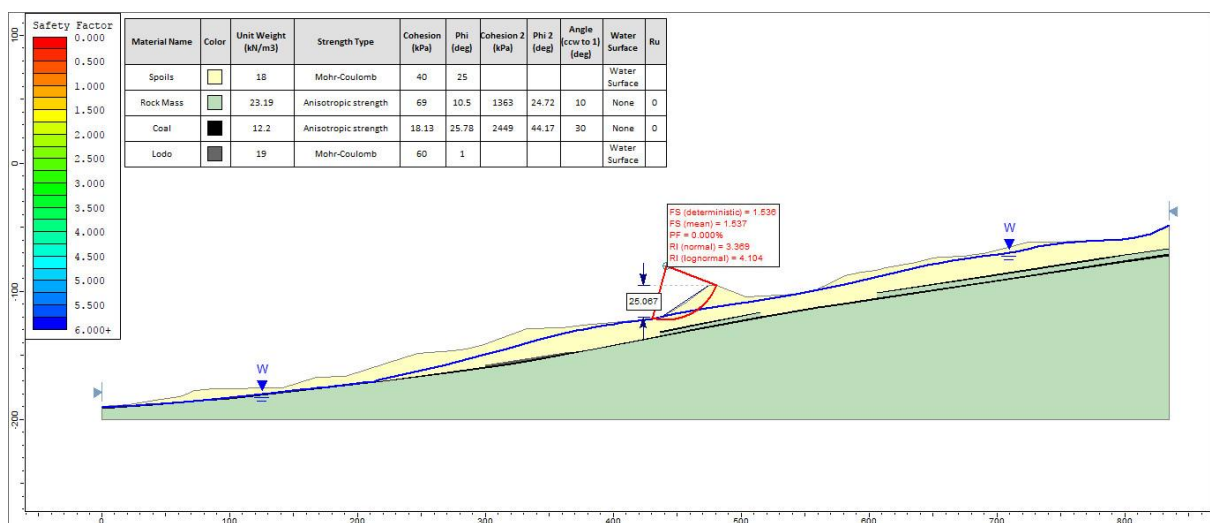


Figura 45. Secc2. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

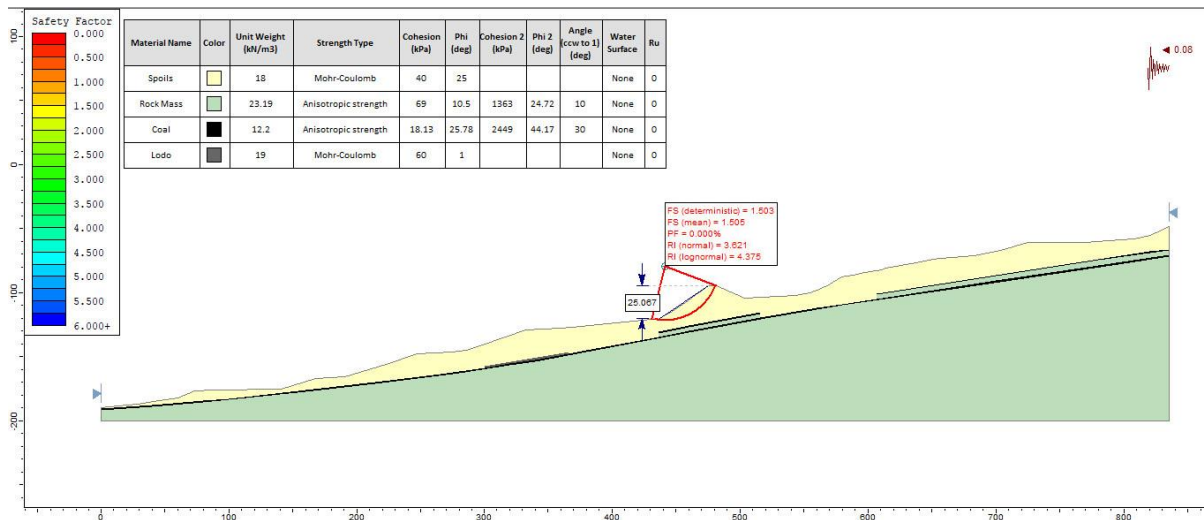


Figura 46. . Secc2.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.

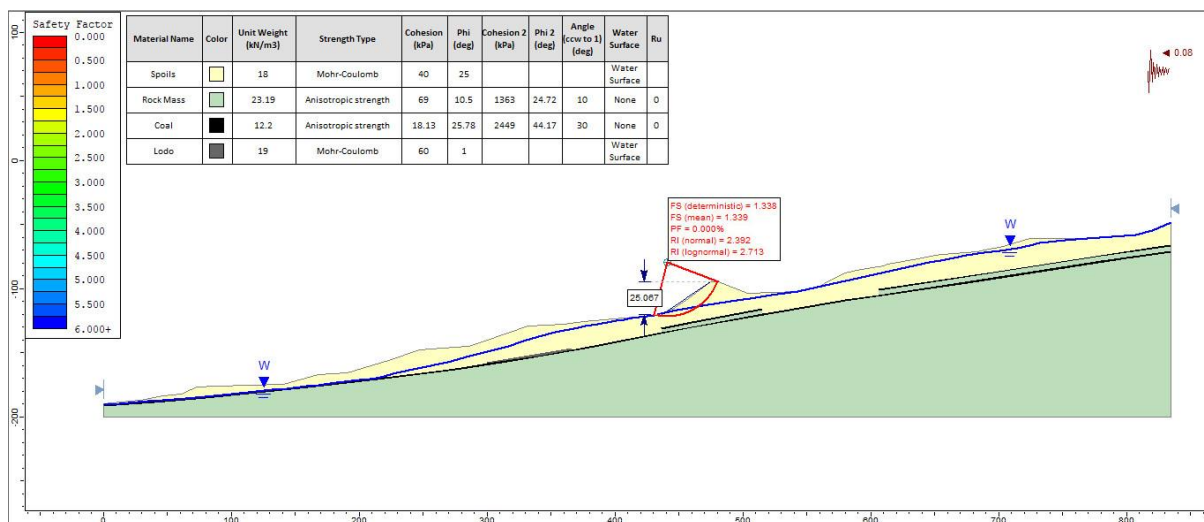


Figura 47. Secc2.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.

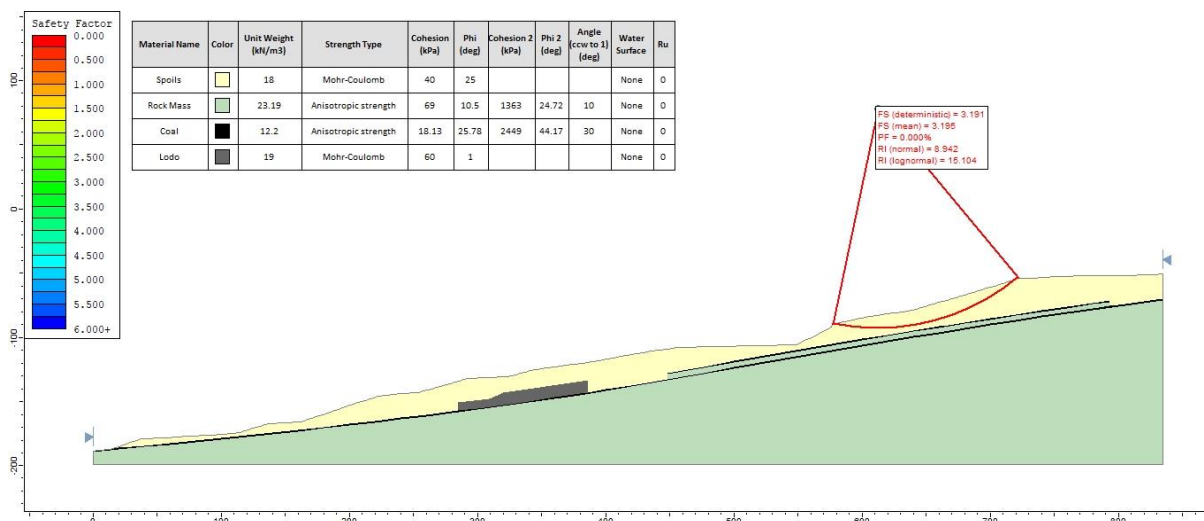


Figura 48. Secc3.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

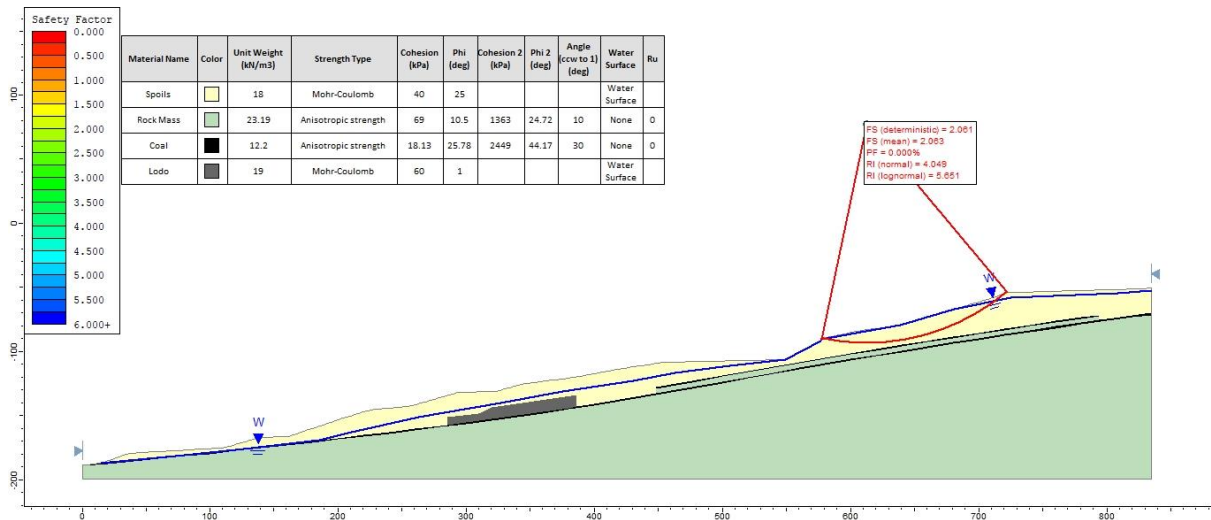


Figura 49. Secc3.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

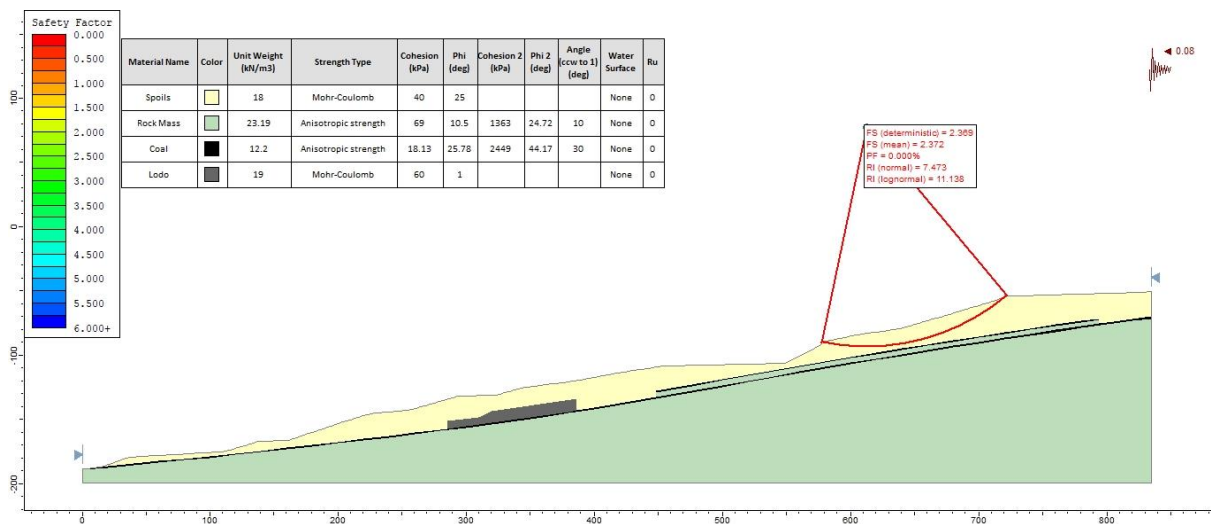


Figura 50. Secc3.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.

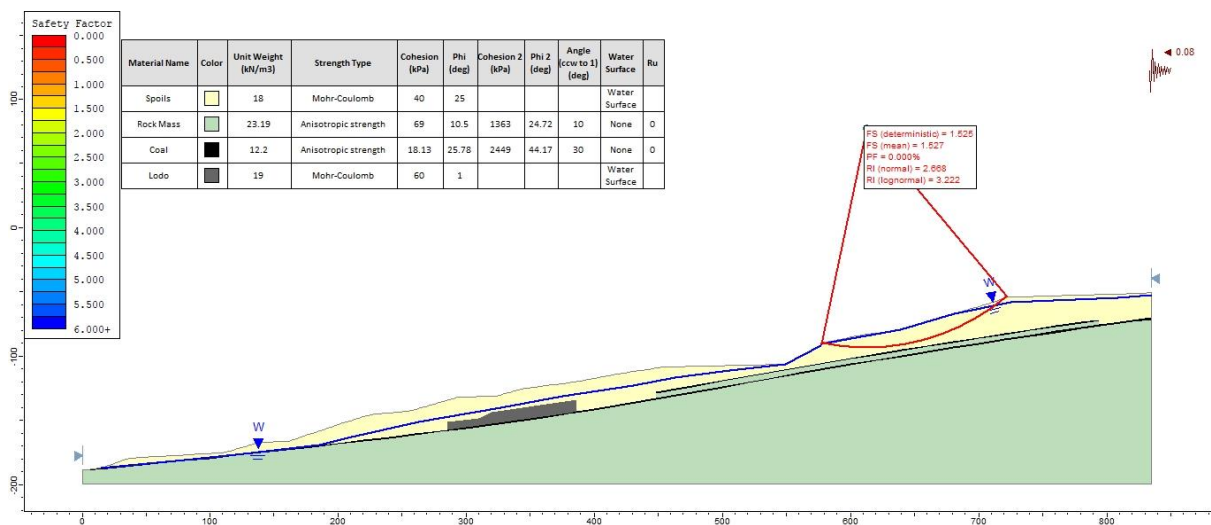


Figura 51. Secc3.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.

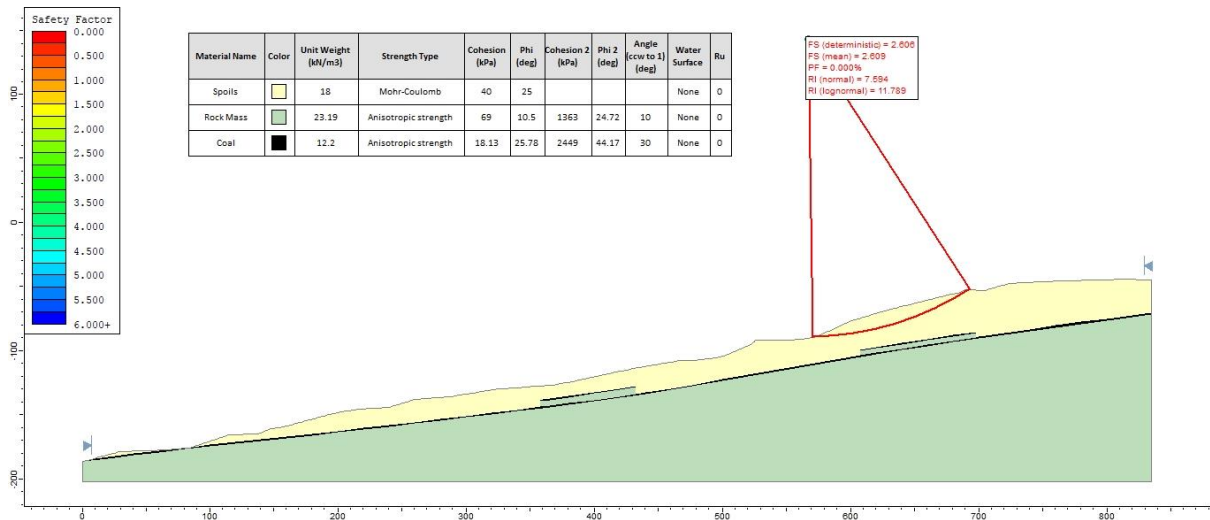


Figura 52. Secc4.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

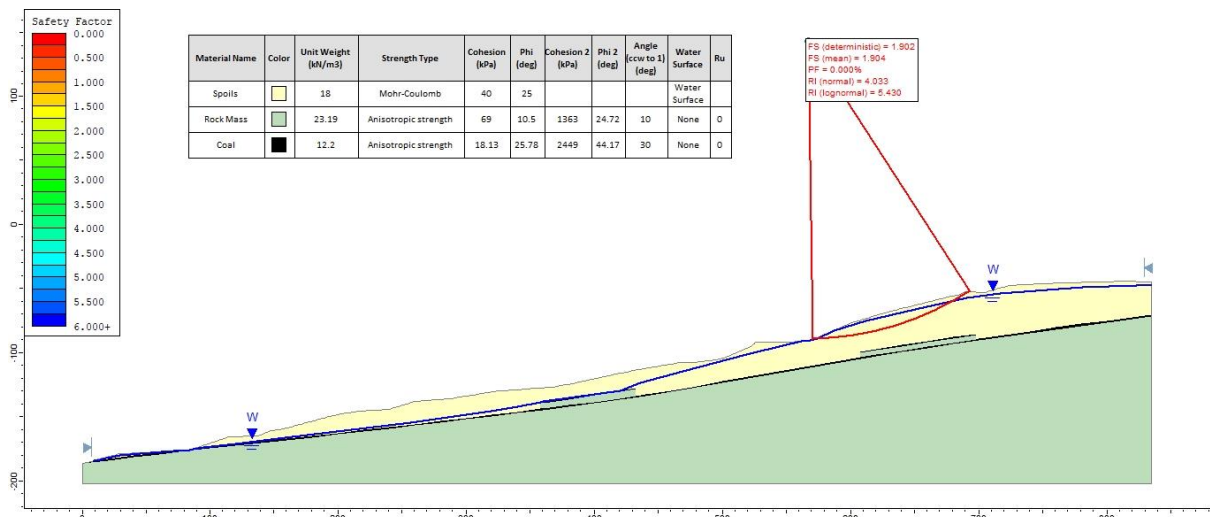


Figura 53. Secc4.Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

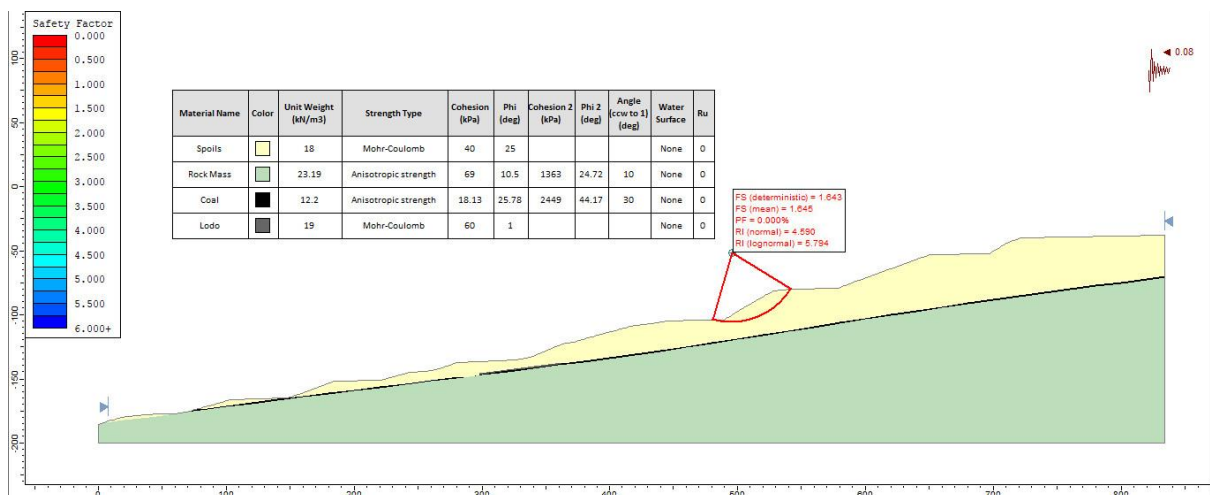


Figura 54. Secc4.Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.

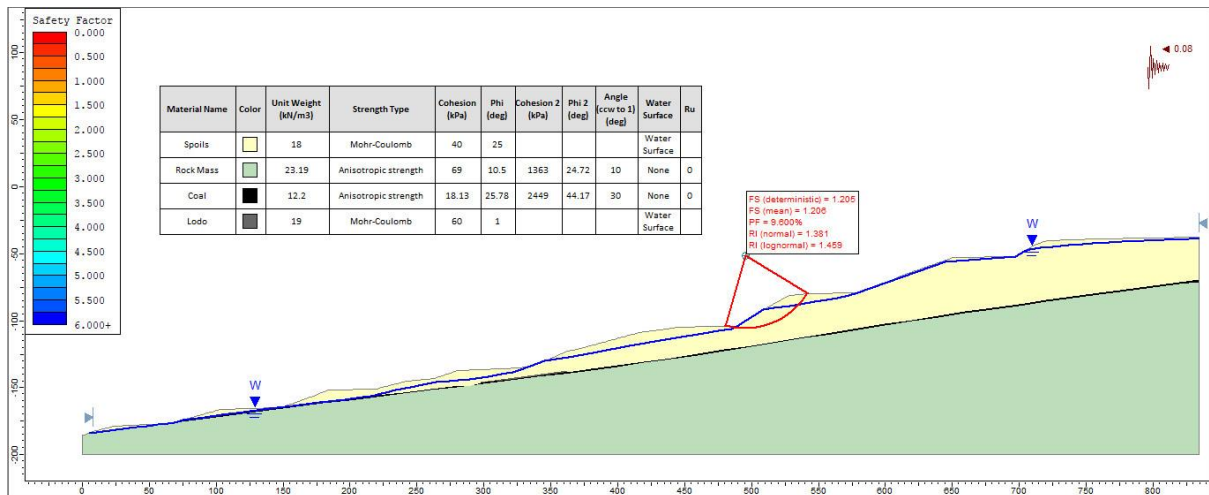


Figura 55. Secc4. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.

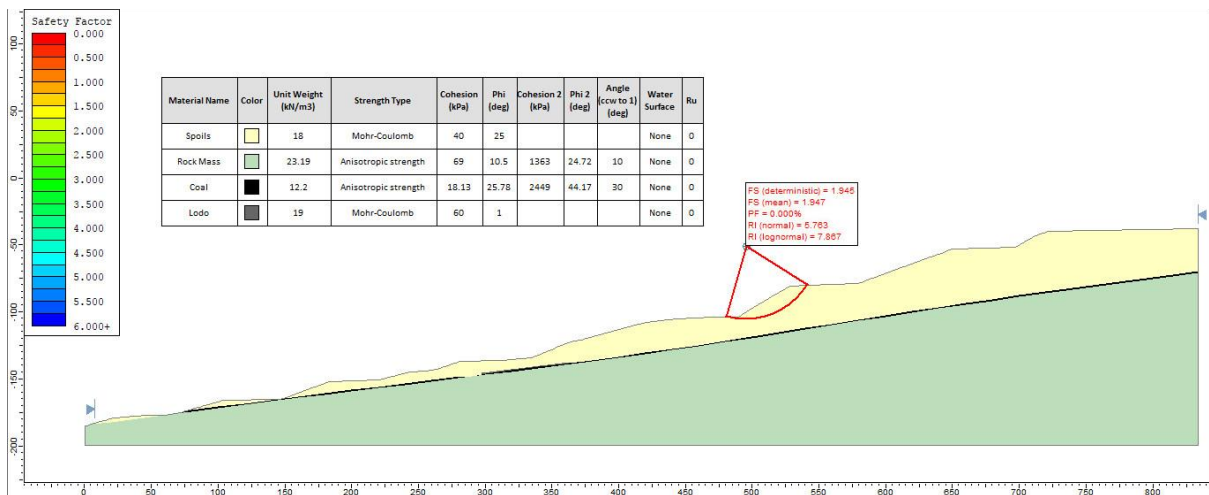


Figura 56. Secc5. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

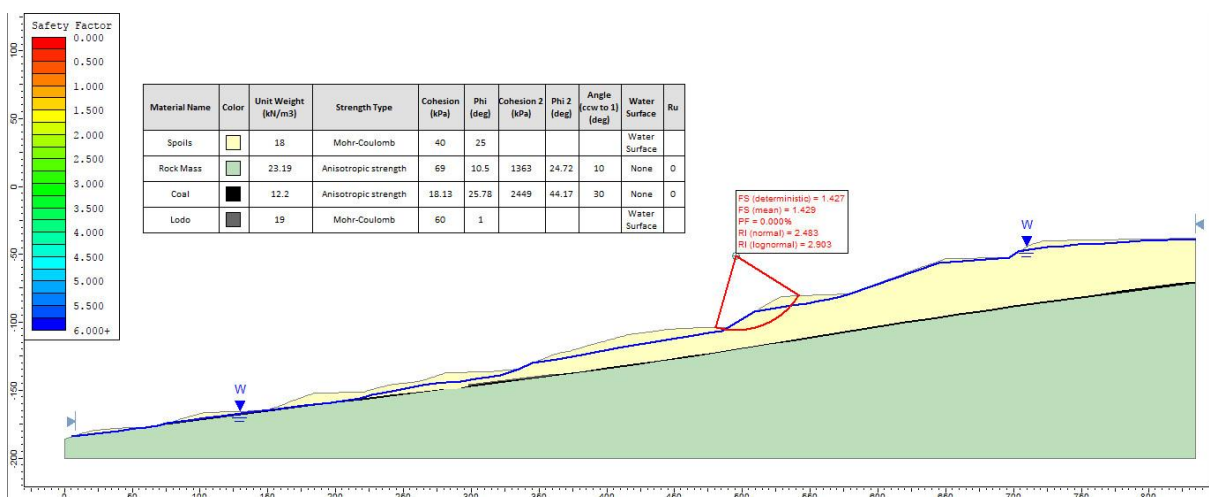


Figura 57. Secc5. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición normal.

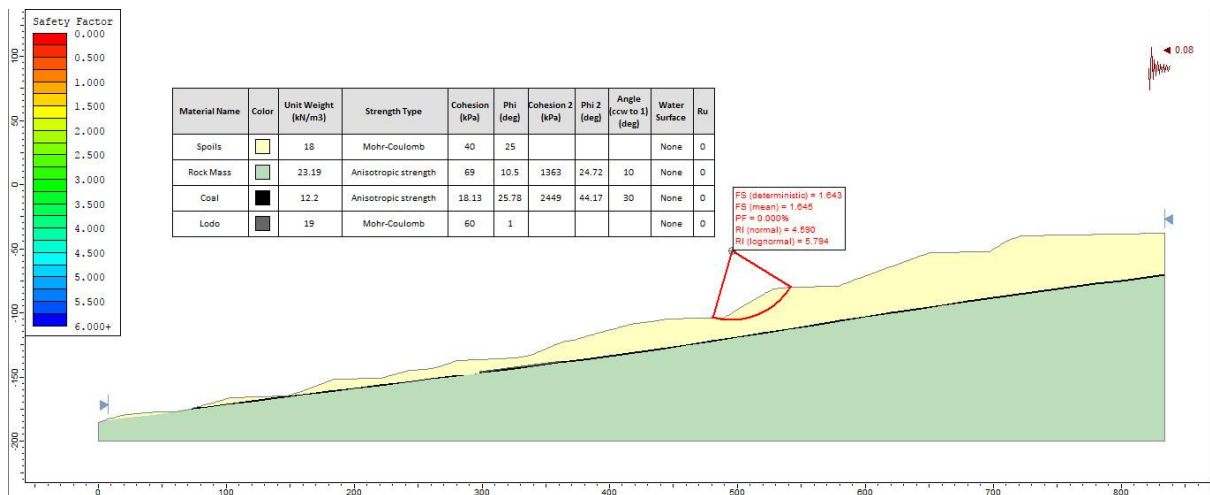


Figura 58. Secc5. Talud Normal. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestático.

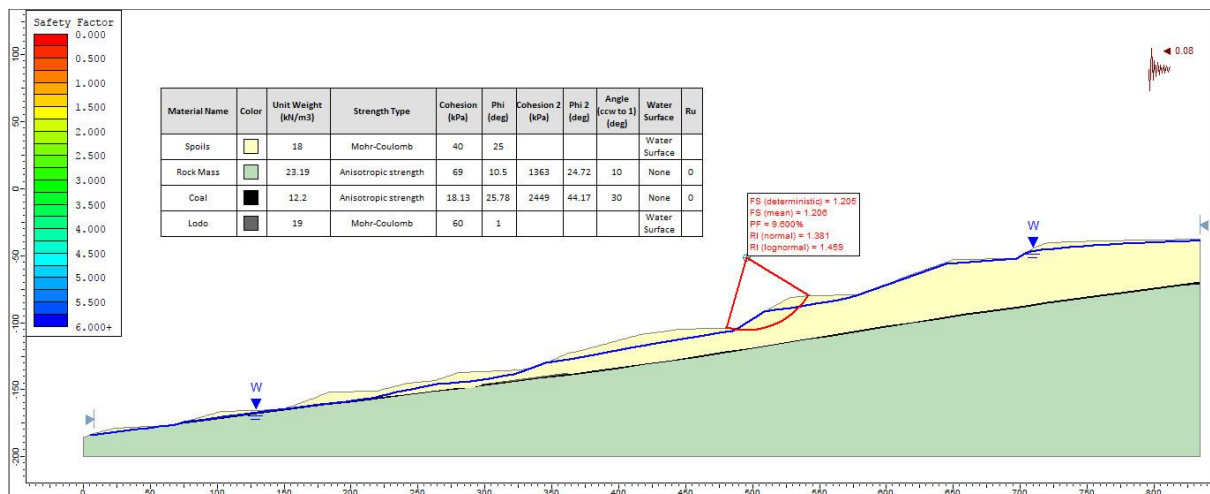


Figura 59. Secc5. Talud con nivel de agua. Pared baja área escombrera. Falla Circular. Condición pseudoestática.

Tabla 17. Factores de seguridad y probabilidad de falla Taludes Escombrera en Pared Baja Mina la Loma. Falla Circular.

SECCIÓN	COND NORMAL		COND. EXTREMA	
	Análisis estático		Análisis pseudoestático	Análisis pseudoestático $k_n = 0.08$ y Agua "normal"
	Talud Seco	Agua "Normal"	Talud seco	
Sección 1	1.5	1.3 (0.0%)	1.3 (0.0%)	1.1 (5.10%)
Sección 2	1.7	1.5 (0.0%)	1.5 (0.0%)	1.3 (0.0%)
Sección 3	3.1	2.0 (0.0%)	2.3 (0.0%)	1.5 (0.0%)
Sección 4	2.6	2.0 (0.0%)	2.0 (0.0%)	1.4 (0.0%)
Sección 5	1.9	1.4 (0.0%)	1.6 (0.0%)	1.2 (9.6%)

Fuente: Autor

Con respecto a los valores de probabilidad de falla es importante recalcar que tal y como lo afirma Duncan (2000) el termino falla no se debe asociar necesariamente a un evento catastrófico. Al respecto es relevante mencionar que a pesar de que el factor de seguridad se encuentre en el rango de amenaza media, existen casos en los que la probabilidad de falla obtenida puede llegar a ser menor a 1.0% situación que se da generalmente cuando el factor de seguridad es mayor a 1.4. Así mismos factores de seguridad muy cercanos a 1.0 igualmente arrojan probabilidades de falla tan altas como el 30% lo cual es congruente con lo reportado en literatura (Duncan & Wright, 2005). Siguiendo las recomendaciones dadas por Read & Stacey (2009) y reproducidas en la Tabla 18 se tiene que para los casos de la escombrera en pared baja en análisis estáticos se obtienen probabilidades de falla menores o muy cercanas a la máxima recomendada (i.e. 5%).

Tabla 18. Probabilidades de falla recomendadas en taludes mineros. (Read & Stacey, 2009).

Categoría	Descripción	Prob. de falla (%)
1	Taludes críticos donde la falla puede afectar la operación continua y la seguridad del Pit	<5%
2	Taludes donde la falla tiene un impacto significativo en costos y seguridad	<15%
3	Taludes donde la falla no tiene impacto alguno en costos y donde existe una amenaza mínima a la seguridad	<30%

En lo que respecta a la zona de la Escombrera, los resultados no difieren demasiado, con la salvedad que en la zona estudiada en donde se encuentra la sección 1 y 5, para la condición pseudoestático con agua se obtienen valores de factor de seguridad entre 1.1 y 1.2 lo cual ubicaría este sector en un rango muy cercano al de amenaza media según criterios de análisis para la evaluación de la amenaza. ANLA (2015), con probabilidades de fallas del 5.1% y 9.6%. La razón de estos resultados radica en el Angulo de la pendiente y en que se asumen condiciones extremas con cargas sísmica de 0.08 y agua saliendo por la cara del talud.

No obstante, lo anterior, se considera que esta situación es de carácter temporal y cambiará en la medida que se desarrollen las actividades de disposición de escombros hacia la zona de la pared alta con lo que se generaría un soporte

favoreciendo las condiciones de estabilidad. En las Figuras 40 a 58 se presentan los análisis para la escombrera en pared baja sector sur, en la Tabla 17 se muestran los factores de seguridad obtenidos.

Algo muy importante en lo que respecta al análisis de estabilidad, se calculó la carga sísmica máxima que puede soportar la escombrera tanto para condición Talud seco como para condición Talud con agua, la cual se determinó para un factor de seguridad 1.2 en ambos casos, para la condición normal se obtuvo un valor de 0.1 Kst y para la condición con agua un valor de 0.065 Kst, esta última está muy por debajo del valor máximo utilizado para los análisis en condiciones extremas, con respecto a la norma NSR-10 establece que para suelos (escombros y aluvial en el caso de la mina la Loma) el valor adoptar sería igual a 0.8. Por su parte, el mismo documento establece que para la zona en donde se encuentran localizada la mina el valor del coeficiente de aceleración sísmico (A_a) a adoptar debe ser igual a 0.1, en conclusión, la escombrera no puede soportar una carga sísmica superior a 0.065 Kst, es necesario que sea menor para mantener la estabilidad, en las figuras 59 y 60 se observan los cálculos realizados.

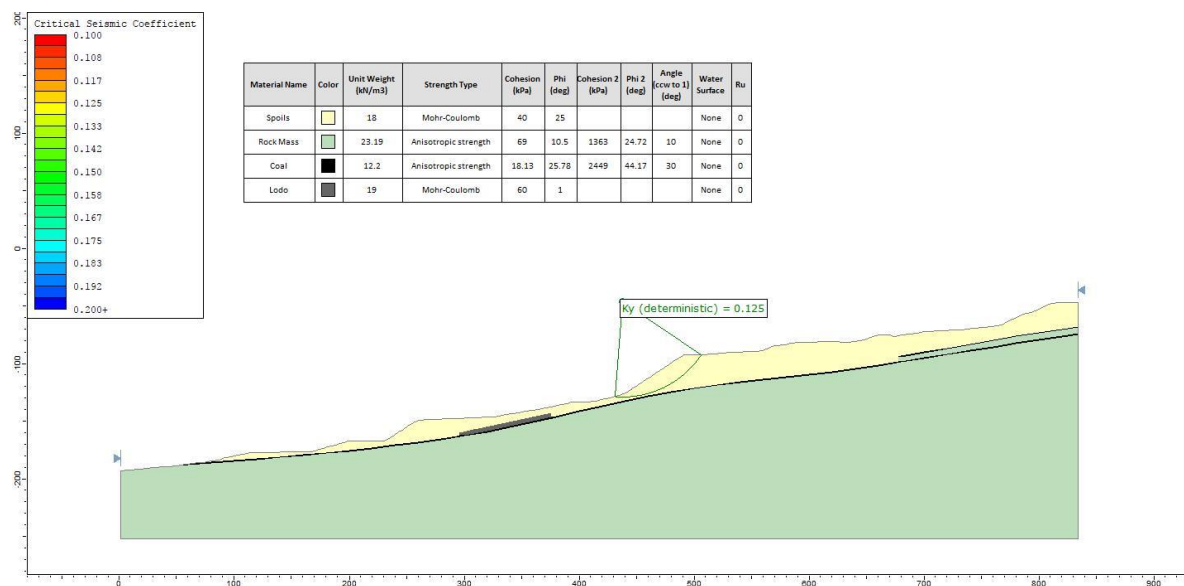


Figura 60. Secc1. Talud Seco. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal. Carga Sísmica Máxima Admisible.

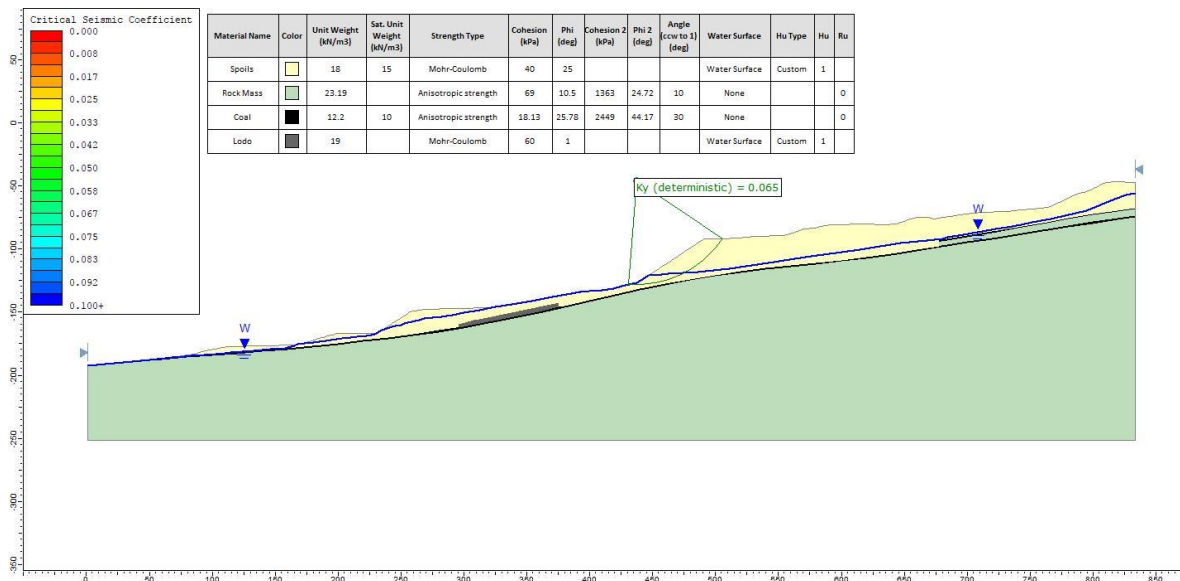


Figura 61. Secc1.Talud con agua. Pared baja área escombrera. Falla circular. Condición normal con agua. Carga Sísmica Máxima Admisible.

4.1.13.12. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

Para tener un control de prevención sobre algún mecanismo de inestabilidad en curso, es necesario de un programa de monitoreo, este programa de monitoreo debe ser de una frecuencia tal que permita prevenir cualquier riesgo a las personas o a los equipos que se encuentren en el área de influencia, para mantener una alerta de las condiciones de estabilidad en tiempo real (en este caso en la escombrera, objeto de este estudio), para esto se realizó un análisis de los datos de acuerdo a la metodología de Cruden y Varnes el cual clasifica la velocidad de la escombrera de 1 a 7 para posteriormente identificar el tipo de alarma que proporciona dicha aceleración, lo anterior se complementa con el criterio de Fukuzono para evaluar eventuales mecanismos de falla, su teoría se basa en la velocidad inversa que predice el tiempo de falla de un talud basado en pruebas de laboratorio a gran escala que simulaban la inducción de la lluvia potencial de deslizamiento en masas de suelo en varios ángulos de talud. Las condiciones simuladas en el laboratorio fueron consideradas característica de las condiciones de aceleración de reptación o fluencia (es decir, de formación continua lenta) bajo efecto de la carga de gravedad.

La evaluación de los datos de laboratorio condujo al reconocimiento de que el logaritmo de la aceleración de la superficie de deslizamiento aumenta en proporción al logaritmo de la velocidad de superficie, lo que resulta en algunos casos, a correlaciones lineales aproximadas. Cuando se trazó la velocidad inversa versus tiempo, los valores de velocidad inversa se acercaron a cero cuando la velocidad aumenta asintóticamente hacia la falla. Trazado gráficamente, una línea de tendencia a través de valores de velocidad inversa frente al tiempo se encontró proyectar al eje x (valor cero de velocidad inversa), prediciendo el tiempo aproximado de falla, como se muestra en la fórmula propuesta. Fukuzono presentó tres tipos de gráficos a los datos de laboratorio (es decir, cóncavos, convexos o lineal) basado en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{V} = [A(\alpha - 1)]^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot (t_f - t)^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

donde A y α son constantes y t_f es el momento de la falla. En los experimentos de laboratorio, se encontró que el rango oscila entre 1.5 a 2.2. Como se muestra en la Figura 60, la curva de velocidad inversa es lineal cuando $\alpha = 2$, cóncavo cuando $\alpha < 2$ y convexo cuando $\alpha > 2$. Basado en los resultados de laboratorio, Fukuzono concluyó que unas tendencias lineales se ajustan a través de los datos de velocidad inversa proporcionando una estimación razonable de tiempo de falla, poco antes de la falla. Sustituyendo un valor de $\alpha = 2$ en Eq. 1.

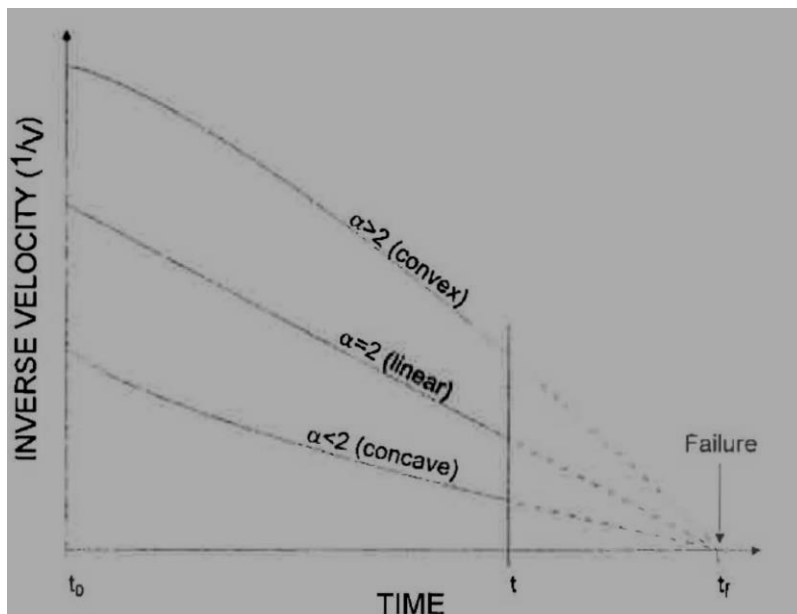


Figura 62. Inverso de la velocidad vs tiempo de falla de un talud (Fukuzono).

4.1.13.12.1. Metodología.

Suponiendo que las condiciones de aceleración del tipo de deslizamiento pueden ser características del mecanismo de falla de talud bajo investigación (es decir, poco potencial para una falla frágil rápida), el enfoque de velocidad inversa también es una herramienta útil para evaluar el tiempo potencial de falla. En las primeras etapas del desarrollo de la falla, cuando las aceleraciones del talud pueden ser relativamente bajas, las tendencias de velocidad inversa se pueden utilizar para pronosticar el tiempo de falla potencial, permitiendo que se seleccionen velocidades de movimiento de umbral apropiadas para una operación segura. Una ventaja principal de este enfoque es que las tasas de movimiento del umbral se pueden seleccionar en función de la duración del tiempo que precede a la falla, en lugar de basarse solo en estimaciones empíricas. Sin embargo, se debe usar un enfoque cauteloso en la aplicación de este método, de modo que la complacencia no se desarrolle con base en la precisión asumida en las predicciones del tiempo de falla del talud. Como en el caso de cualquier método de predicción de fallas, la precisión del sistema de monitoreo y la aproximación del filtrado de datos pueden influir significativamente en las tendencias predichas. El potencial de cambios en el comportamiento de la pendiente también debe tenerse en cuenta. Como tal, se debe contratar expertos especializados cuando las consecuencias posibles de la falla del talud puedan afectar negativamente al personal, el equipo o la infraestructura de la mina.

4.1.13.12.2. Monitoreo del Movimiento del Talud

El monitoreo del movimiento del Talud, incluso en su forma más simple, debe llevarse a cabo en todas las situaciones mineras. La inspección visual regular en busca de signos de agrietamiento por tensión, actividad de caída de rocas, degradación del talud, abombamientos en la ladera o movimientos en la cresta de un talud puede proporcionar una advertencia avanzada de inestabilidad potencial. Dependiendo de la duración de la extracción y las alturas de los taludes de mina, se propone una serie de prismas de sondeo reticular ubicados cerca de la cresta del pit que proporciona una línea base de desplazamientos de taludes, a partir de los cuales se pueden evaluar los posibles cambios en el comportamiento del mismo. En áreas potencialmente inestables donde se detectan grietas de tensión o movimientos del

talud, se deben instalar prismas reflectivos, extensómetros de cable o monitores de grietas para registrar las direcciones del movimiento en superficie, para ayudar en las interpretaciones de posibles mecanismos de falla.

Dependiendo de la precisión del sistema de monitoreo, se puede requerir el filtrado de datos para evitar los efectos del error del instrumento, así como del "ruido", también movimientos aparentes causados por cambios de temperatura o por episodios de vibración de voladura periódica. En minas a cielo abierto grandes como Pribbenow, pueden requerirse distancias considerables para inspeccionar los prismas en la dirección opuesta al movimiento de la pendiente. A grandes distancias, la refracción óptica y los efectos de temperatura y presión diurna pueden provocar un error apreciable, incluso con los sistemas de supervisión más precisos. Los futuros avances en los métodos de monitoreo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) pueden ayudar a superar estos problemas. La magnitud del error del instrumento en las lecturas topográficas se puede estimar trazando datos con puntos de referencia muy estables ubicados a distancias y elevaciones similares desde el instrumento. La dispersión relativa en los datos tomados se puede evaluar para determinar la magnitud. Para duraciones cortas entre mediciones de levantamiento, el error del instrumento puede tener un efecto significativo en la capacidad de detectar velocidades de movimiento de bajo nivel (velocidad), debido a la relación del error al movimiento detectado.

El nivel apropiado de filtrado o suavizado generalmente se determina a modo de prueba y puede requerir la consideración de diferentes duraciones de tiempo entre los valores tomados, tales como: un día, siete días, 15 días o 30 días. El filtrado de datos debe incorporarle el incremento de tiempo más corto que proporcione la mejor resolución de velocidad sin efectos significativos del error.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de monitoreo realizado en el área de la escombrera, donde se evidencia dos eventos de deslizamientos ocurridos en la zona, el primero antes del análisis realizado y el segundo en el mismo lapso de tiempo en que se llevaba a cabo dicho análisis.

Tabla 19. Monitoreo de la escombrera (prisma 8).

NO.	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPTOR	PRISMA	Mes	Día	Año	Hora	Δ (cm)	velo (cm/día)
717	1064368.378	1547898.165	-140.254	PA8/092217/7:16 AM		09	22	2017	7:16 AM	1.470	1.46
720	1064368.369	1547898.168	-140.249	PA8/092217/1:42 PM		09	22	2017	1:42 PM	1.072	4.00
723	1064368.356	1547898.178	-140.238	PA8/092317/2:50 PM		09	23	2017	2:50 PM	1.975	1.89
726	1064368.374	1547898.173	-140.229	PA8/092417/7:20 AM		09	24	2017	7:20 AM	2.039	2.97
729	1064367.542	1547898.392	-140.320	PA8/092417/1:16 PM		09	24	2017	1:16 PM	86.475	349.79
732	1064363.974	1547899.149	-140.693	PA8/092417/2:05 PM		09	24	2017	2:05 PM	366.654	10,775.14
734	1064360.956	1547899.762	-141.120	PA8/092417/2:40 PM		09	24	2017	2:40 PM	310.899	12,791.27
736	1064357.362	1547900.500	-141.460	PA8/092417/3:45 PM		09	24	2017	3:45 PM	368.471	8,163.05
738	1064355.750	1547900.773	-141.670	PA8/092417/4:20 PM		09	24	2017	4:20 PM	164.838	6,781.93
740	1064354.377	1547901.053	-141.855	PA8/092417/4:50 PM		09	24	2017	4:50 PM	141.342	6,784.41
742	1064353.208	1547901.296	-141.940	PA8/092417/5:25 PM		09	24	2017	5:25 PM	119.701	4,924.84
745	1064355.876	1547905.376	-141.317	PA8/092517/6:56 AM		09	25	2017	6:56 AM	491.472	872.65
748	1064356.292	1547905.337	-141.351	PA8/092517/7:48 AM		09	25	2017	7:48 AM	41.856	1,159.09
751	1064365.767	1547905.321	-141.423	PA8/092517/9:54 AM		09	25	2017	9:54 AM	947.549	10,829.13
754	1064355.720	1547905.335	-141.416	PA8/092517/10:50 AM		09	25	2017	10:50 AM	1,004.701	25,835.17
757	1064355.712	1547905.322	-141.426	PA8/092517/11:49 AM		09	25	2017	11:49 AM	1.825	44.54
760	1064355.709	1547905.324	-141.423	PA8/092517/12:47 PM		09	25	2017	12:47 PM	0.469	11.65
763	1064355.716	1547905.350	-141.428	PA8/092517/1:58 PM		09	25	2017	1:58 PM	2.713	55.02
766	1064355.698	1547905.322	-141.470	PA8/092517/2:49 PM		09	25	2017	2:49 PM	5.385	152.04
769	1064355.707	1547905.313	-141.440	PA8/092517/3:56 PM		09	25	2017	3:56 PM	3.262	70.11
772	1064355.705	1547905.317	-141.446	PA8/092517/4:45 PM		09	25	2017	4:45 PM	0.748	21.99
775	1064355.710	1547905.320	-141.432	PA8/092617/7:17 AM		09	26	2017	7:17 AM	1.513	2.50
778	1064355.708	1547905.324	-141.445	PA8/092717/7:10 AM		09	27	2017	7:10 AM	1.373	1.38
781	1064355.717	1547905.306	-141.449	PA8/092817/7:14 AM		09	28	2017	7:14 AM	2.052	2.05

Fuente: Autor

Tabla 20. Monitoreo de la escombrera (prisma 9).

NO.	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPTOR	PRISMA	Mes	Día	Año	Hora	Δ (cm)	velo (cm/día)	IVR (Día/cm)
717	1064368.378	1547898.165	-140.254	PA8/092217/7:16 AM		09	22	2017	7:16 AM	1.470	1.46	0.68
720	1064368.369	1547898.168	-140.249	PA8/092217/1:42 PM		09	22	2017	1:42 PM	1.072	4.00	0.25
723	1064368.356	1547898.178	-140.238	PA8/092317/2:50 PM		09	23	2017	2:50 PM	1.975	1.89	0.53
726	1064368.374	1547898.173	-140.229	PA8/092417/7:20 AM		09	24	2017	7:20 AM	2.039	2.97	0.34
729	1064367.542	1547898.392	-140.320	PA8/092417/1:16 PM		09	24	2017	1:16 PM	86.475	349.79	0.00
732	1064363.974	1547899.149	-140.693	PA8/092417/2:05 PM		09	24	2017	2:05 PM	366.654	10,775.14	0.00
734	1064360.956	1547899.762	-141.120	PA8/092417/2:40 PM		09	24	2017	2:40 PM	310.899	12,791.27	0.00
736	1064357.362	1547900.500	-141.460	PA8/092417/3:45 PM		09	24	2017	3:45 PM	368.471	8,163.05	0.00
738	1064355.750	1547900.773	-141.670	PA8/092417/4:20 PM		09	24	2017	4:20 PM	164.838	6,781.93	0.00
740	1064354.377	1547901.053	-141.855	PA8/092417/4:50 PM		09	24	2017	4:50 PM	141.342	6,784.41	0.00
742	1064353.208	1547901.296	-141.940	PA8/092417/5:25 PM		09	24	2017	5:25 PM	119.701	4,924.84	0.00
745	1064355.876	1547905.376	-141.317	PA8/092517/6:56 AM		09	25	2017	6:56 AM	491.472	872.65	0.00
748	1064356.292	1547905.337	-141.351	PA8/092517/7:48 AM		09	25	2017	7:48 AM	41.856	1,159.09	0.00
751	1064365.767	1547905.321	-141.423	PA8/092517/9:54 AM		09	25	2017	9:54 AM	947.549	10,829.13	0.00
754	1064355.720	1547905.335	-141.416	PA8/092517/10:50 AM		09	25	2017	10:50 AM	1,004.701	25,835.17	0.00
757	1064355.712	1547905.322	-141.426	PA8/092517/11:49 AM		09	25	2017	11:49 AM	1.825	44.54	0.02
760	1064355.709	1547905.324	-141.423	PA8/092517/12:47 PM		09	25	2017	12:47 PM	0.469	11.65	0.09
763	1064355.716	1547905.350	-141.428	PA8/092517/1:58 PM		09	25	2017	1:58 PM	2.713	55.02	0.02
766	1064355.698	1547905.322	-141.470	PA8/092517/2:49 PM		09	25	2017	2:49 PM	5.385	152.04	0.01
769	1064355.707	1547905.313	-141.440	PA8/092517/3:56 PM		09	25	2017	3:56 PM	3.262	70.11	0.01
772	1064355.705	1547905.317	-141.446	PA8/092517/4:45 PM		09	25	2017	4:45 PM	0.748	21.99	0.05
775	1064355.710	1547905.320	-141.432	PA8/092617/7:17 AM		09	26	2017	7:17 AM	1.513	2.50	0.40
778	1064355.708	1547905.324	-141.445	PA8/092717/7:10 AM		09	27	2017	7:10 AM	1.373	1.38	0.72
781	1064355.717	1547905.306	-141.449	PA8/092817/7:14 AM		09	28	2017	7:14 AM	2.052	2.05	0.49

Fuente: Autor

En las tablas anteriores 19 y 20 se observa los desplazamientos críticos y velocidades de los prismas 8 y 9 los cuales fueron los que reflejaron el comportamiento del deslizamiento hasta el momento de volver a estabilizarse. Cabe destacar que este evento ocurrió antes de efectuar correcciones y el análisis de estabilidad.

El día 18/01/2018 se presentó un nuevo evento de deslizamiento en el área, no mayor a los 30 cm de desplazamiento, esto debido a que empezaron a botar en la zona que aún no estaba dentro del plan de botaderos, la sobrecarga sufrida causó el pequeño desplazamiento que se observa en las tablas 21 y 22, evidenciado en los prismas 10

y 12, cabe añadir que otros de los factores que influyeron fue el manejo de las aguas a cargo del personal de botaderos, finalmente debido que en la zona local del deslizamiento presenta un área de lodo que subyace dicha escombrera la cual actúa como agente desencadenante al movimiento, como se observa en la figura 61.

Tabla 21. Monitoreo de la escombrera (prisma 10).

NO.	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPTOR	PRISMA	Mes	Día	Año	Hora	Δ (cm)	velo (cm/día)	IVR (Día/cm)
1376	1064438.026	1547903.172	-122.882	PA10/010818/1:23 PM		01	08	2018	1:23 PM	2.007	0.32	3.09
1380	1064438.034	1547903.170	-122.884	PA10/011218/7:18 AM		01	12	2018	7:18 AM	0.849	0.23	4.41
1385	1064438.030	1547903.163	-122.881	PA10/011418/6:48 AM		01	14	2018	6:48 AM	0.860	0.43	2.30
1390	1064438.029	1547903.161	-122.873	PA10/011618/7:06 AM		01	16	2018	7:06 AM	0.831	0.41	2.42
1394	1064438.033	1547903.167	-122.876	PA10/011818/7:03 AM		01	18	2018	7:03 AM	0.781	0.39	2.56
1398	1064437.752	1547903.243	-123.116	PA10/011918/11:35 AM		01	19	2018	11:35 AM	37.728	31.73	0.03
1402	1064437.741	1547903.247	-123.104	PA10/011918/1:18 PM		01	19	2018	1:18 PM	1.676	23.44	0.04
1406	1064437.737	1547903.228	-123.096	PA10/012018/6:53 AM		01	20	2018	6:53 AM	2.100	2.87	0.35
1410	1064437.732	1547903.243	-123.091	PA10/012018/11:41 AM		01	20	2018	11:41 AM	1.658	8.29	0.12
1414	1064437.726	1547903.234	-123.097	PA10/012018/11:30 PM		01	20	2018	11:30 PM	1.237	2.51	0.40
1418	1064437.741	1547903.245	-123.082	PA10/012118/7:33 AM		01	21	2018	7:33 AM	2.390	7.12	0.14
1426	1064437.746	1547903.253	-123.079	PA10/012218/7:52 AM		01	22	2018	7:52 AM	0.990	0.98	1.02
1430	1064437.735	1547903.248	-123.084	PA10/012218/11:33 AM		01	22	2018	11:33 AM	1.308	8.52	0.12
1434	1064437.731	1547903.252	-123.076	PA10/012218/1:13 PM		01	22	2018	1:13 PM	0.980	14.11	0.07
1438	1064437.718	1547903.261	-123.087	PA10/012318/11:15 AM		01	23	2018	11:15 AM	1.926	2.10	0.48
1442	1064437.738	1547903.263	-123.096	PA10/012418/6:59 AM		01	24	2018	6:59 AM	2.202	2.68	0.37
1450	1064437.732	1547903.262	-123.092	PA10/012518/11:33 AM		01	25	2018	11:33 AM	0.728	0.61	1.63
1454	1064437.726	1547903.257	-123.090	PA10/012518/12:58 PM		01	25	2018	12:58 PM	0.806	13.66	0.07
1458	1064437.728	1547903.252	-123.087	PA10/012518/2:03 PM		01	25	2018	2:03 PM	0.616	13.66	0.07
1462	1064437.740	1547903.253	-123.092	PA10/012618/7:03 AM		01	26	2018	7:03 AM	1.304	1.84	0.54
1466	1064437.736	1547903.250	-123.086	PA10/012618/2:33 PM		01	26	2018	2:33 PM	0.781	2.50	0.40
1470	1064437.739	1547903.241	-123.080	PA10/012918/6:43 AM		01	29	2018	6:43 AM	1.136	0.42	2.35
1474	1064437.721	1547903.247	-123.097	PA10/012919/11:30 AM		01	29	2018	11:30 AM	2.564	12.87	0.08
1478	1064437.711	1547903.248	-123.088	PA10/012918/1:08 PM		01	29	2018	1:08 PM	1.349	19.82	0.05
1482	1064437.725	1547903.246	-123.093	PA10/012918/3:06 PM		01	29	2018	3:06 PM	1.500	18.31	0.05
1486	1064437.701	1547903.254	-123.104	PA10/013018/1:33 PM		01	30	2018	1:33 PM	2.759	2.95	0.34

Fuente: Autor

Tabla 22. Monitoreo de la escombrera (prisma 12).

NO.	ESTE	NORTE	COTA	DESCRIPTOR	PRISMA	Mes	Día	Año	Hora	Δ (cm)	velo (cm/día)	IVR (Día/cm)
1370	1064321.246	1547870.253	-139.157	PA12/122917/7:16 AM		12	29	2017	7:16 AM	1.005	0.54	1.86
1374	1064321.250	1547870.264	-139.155	PA12/010218/8:28 AM		01	02	2018	8:28 AM	1.215	0.30	3.33
1378	1064321.231	1547870.268	-139.177	PA12/010818/1:30 PM		01	08	2018	1:30 PM	2.968	0.48	2.09
1382	1064321.238	1547870.262	-139.161	PA12/011218/7:21 AM		01	12	2018	7:21 AM	1.872	0.50	2.00
1387	1064321.234	1547870.257	-139.160	PA12/011418/6:50 AM		01	14	2018	6:50 AM	0.648	0.33	3.05
1391	1064321.232	1547870.258	-139.164	PA12/011618/7:08 AM		01	16	2018	7:08 AM	0.458	0.23	4.39
1395	1064321.236	1547870.263	-139.148	PA12/011818/7:06 AM		01	18	2018	7:06 AM	1.723	0.86	1.16
1399	1064320.220	1547870.323	-139.618	PA12/011918/11:4 AM		01	19	2018	11:4 AM	112.105	96.20	0.01
1403	1064320.212	1547870.332	-139.632	PA12/011918/1:20 PM		01	19	2018	1:20 PM	1.847	19.55	0.05
1407	1064320.212	1547870.342	-139.646	PA12/012018/7:05 AM		01	20	2018	7:05 AM	1.720	2.33	0.43
1411	1064320.208	1547870.330	-139.640	PA12/012018/11:38 AM		01	20	2018	11:38 AM	1.400	7.38	0.14
1415	1064320.208	1547870.346	-139.640	PA12/012018/1:16 PM		01	20	2018	1:16 PM	1.600	23.51	0.04
1419	1064320.209	1547870.338	-139.630	PA12/012118/7:36 AM		01	21	2018	7:36 AM	1.285	1.68	0.59
1423	1064320.192	1547870.331	-139.624	PA12/012118/2:04 PM		01	21	2018	2:04 PM	1.934	7.18	0.14
1427	1064320.196	1547870.319	-139.634	PA12/012218/7:54 AM		01	22	2018	7:54 AM	1.612	2.17	0.46
1431	1064320.185	1547870.318	-139.636	PA12/012218/11:36 AM		01	22	2018	11:36 AM	1.122	7.28	0.14
1435	1064320.186	1547870.326	-139.641	PA12/012218/1:16 PM		01	22	2018	1:16 PM	0.949	13.66	0.07
1439	1064320.190	1547870.325	-139.634	PA12/012318/11:20 AM		01	23	2018	11:20 AM	0.812	0.88	1.13
1443	1064320.203	1547870.334	-139.625	PA12/012418/7:02 AM		01	24	2018	7:02 AM	1.819	2.22	0.45
1451	1064320.188	1547870.338	-139.646	PA12/012518/11:34 AM		01	25	2018	11:34 AM	2.612	2.20	0.46
1455	1064320.183	1547870.328	-139.630	PA12/012518/1:00 PM		01	25	2018	1:00 PM	1.952	32.68	0.03
1459	1064320.186	1547870.332	-139.627	PA12/012518/2:05 PM		01	25	2018	2:05 PM	0.583	12.92	0.08
1463	1064320.196	1547870.321	-139.620	PA12/012618/7:10 AM		01	26	2018	7:10 AM	1.643	2.31	0.43
1467	1064320.200	1547870.332	-139.614	PA12/012618/2:35 PM		01	26	2018	2:35 PM	1.315	4.26	0.23
1471	1064320.199	1547870.343	-139.624	PA12/012918/6:45 AM		01	29	2018	6:45 AM	1.491	0.56	1.79
1475	1064320.190	1547870.352	-139.632	PA12/012918/11:33 AM		01	29	2018	11:33 AM	1.491	7.46	0.13
1479	1064320.181	1547870.361	-139.641	PA12/013018/1:33 PM		01	30	2018	1:33 PM	1.740	25.70	0.04

Fuente: Autor

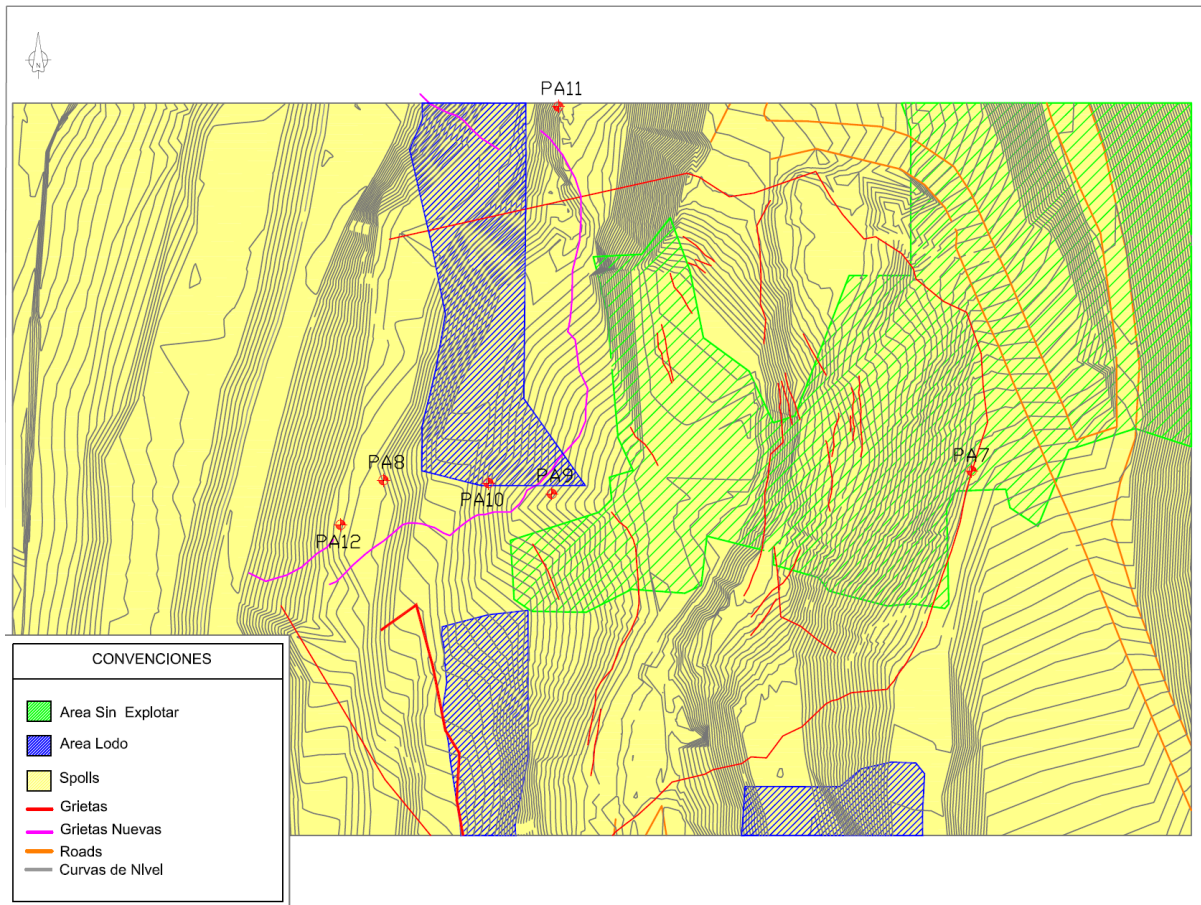


Figura 63. Mapa ubicación de prismas y Grietas.

En los anexos C. informe de monitoreo se puede apreciar con más detalles el análisis realizado con los datos tomados con los prismas y estación total.

4.1.13.13. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

A partir de los resultados de los análisis de estabilidad y siguiendo los criterios establecidos por la ANLA y el porcentaje de pendiente se obtuvo un mapa de amenaza tanto para condición normal como para la condición extrema de análisis. En dicho mapa se ha establecido la siguiente escala de colores para cada nivel de amenaza.

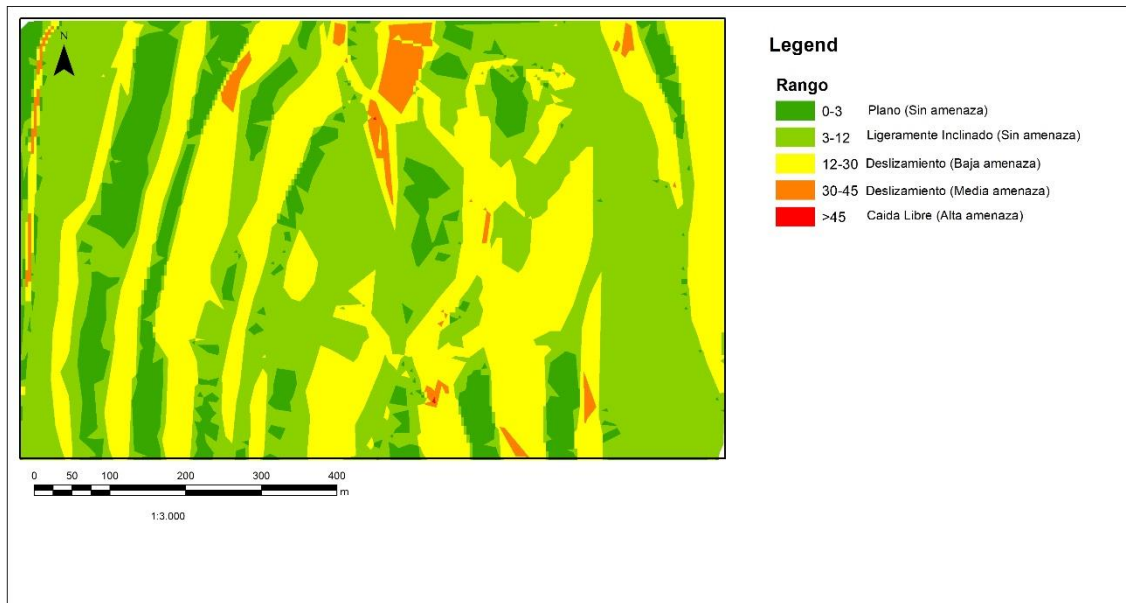
- Color Amarillo: Grado de amenaza bajo.
- Color Naranja: Grado de Amenaza medio.
- Color Rojo: Grado de Amenaza alto.
- Color Verde: No se presenta amenaza alguna por efectos de estabilidad de taludes.

Los resultados muestran que para mecanismos de falla circular debido al tipo de material analizado en el área de la escombrera la mina La Loma este se encuentra

en niveles de Amenaza baja para los escenarios de análisis normales (i.e. $1.2 > FS > 1.9$ conforme al criterio establecido por la ANLA) y para condiciones extremas (i.e. $1.0 > FS > 1.9$) niveles de amenaza media según el intervalo adoptado para el presente informe.

En la Figura 63 se presenta a modo ilustrativo los resultados obtenidos de amenaza para la condición extrema de análisis considerando una falla circular a compuesta.

Figura 64. Evaluación de amenaza. Falla circular y compuesta. Condición normal y extrema.



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

- Para los análisis de estabilidad se evaluó un mecanismo de falla. El cual consistente en la formación de fallas circulares en escombros. El análisis, a partir de la orientación e inclinación actual de los taludes los resultados indican que, si bien la formación de fallas circulares en la escombrera, es posible para algunos casos, las mismas presentan un factor de seguridad apropiado (>1.2), en condiciones normales y con talud seco, por lo que no se considera necesario cambiar las recomendaciones actuales referentes a la inclinación de los bancos y anchos de bermas.
- Para los análisis realizados en condiciones extremas, talud con agua y con un factor sísmico de 0.08 para la escombrera, este revela factores de seguridad entre 1.1 y 1.5 lo cual se considera de acuerdo a lo arrojado por el software que para esas condiciones la escombrera se encuentra en un estado de estabilidad crítica con probabilidades de fallas que van desde 9.6% y 0.0%, lo cual implica tener un monitoreo constante y un enfoque mayor para el área de la escombrera.
- Teniendo en cuenta lo establecido por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), en lo referente al criterio para clasificar el grado de amenaza, se tiene que, para el mecanismo de falla circular, toda la escombrera de la zona sur de la mina Loma se encuentra en lo que se denomina Grado de Amenaza baja para las condiciones de análisis normales. Por su parte, para las condiciones extremas de análisis y de acuerdo al rango de factores de seguridad establecido en desarrollo del presente documento, se concluye que la escombrera se encuentra en un nivel de Amenaza Media.
- El programa de monitoreo aplicado durante todo el seguimiento para la realización de este proyecto fue de gran utilidad y pues gracias a ello fue posible realizar un análisis de los desplazamientos y aceleraciones presentadas en la escombrera arrojando datos muy determinantes que permitieron un mejor entendimiento de su comportamiento.

6. RECOMENDACIONES

- En lo que respecta a la zona de la Escombrera de la zona sur, es importante tener en cuenta la presencia de un manto de arcilla ubicado debajo del manto Alanito, estrato que se caracteriza por presentar un buzamiento desfavorable lo cual constituye un riesgo de presentar inestabilidades. Teniendo en cuenta lo anterior se recomienda seguir efectuando las labores de voladura de rugosidad del manto de arcilla con carga sísmica no superior a 0.065 Kst, la cual según la información de referencia consultada ha sido aplicada anteriormente con buenos resultados.
- Se recomienda tener en cuenta la presencia del área lodo y Carbón sin explotar que se encuentra por debajo de la escombrera, ya que esta actúa como un factor desencadenante a la inestabilidad, se debe seguir el plan de botaderos para esa área (no botar hasta que el retrollenado se estabilice de manera permanente.)
- Se sugiere para la escombrera tener un buen manejo de aguas, ya que esta medida disminuiría la presión de poros y a su vez la probabilidad de falla de la escombrera, Las medidas que se sugiere implementar con respecto al manejo de las aguas de escorrentía se refieren primordialmente a la construcción de cunetas, zanjas de coronación canales flexibles y demás estructuras hidráulicas que permitan una adecuada captación , conducción y disposición de las aguas superficiales, cuyo diseño dependerá de la estimación de los respectivos caudales de escorrentía, además que se deben considerar aspectos como consolidación de suelos (en el caso de las escombreras principalmente).
- Se sugiere que la implementación del programa de monitoreo se siga realizando de manera adecuada, ya que con ello es posible tener un control y prevención de los posibles mecanismos de falla en curso que se puedan presentar,

- En cuanto al programa de monitoreo se pueden usar varios enfoques para filtrar datos y reducir el error del instrumento en la toma de datos, esto incluye:
 - Medición de los movimientos del talud aproximadamente a la misma hora del día para reducir los efectos diurnos;
 - Minimizar el número de topógrafos para reducir la influencia del error del operador;
 - Calcular las velocidades promedias basadas en un incremento de tiempo que incorpora el movimiento suficiente para reducir la relación de error a movimiento detectado; y
 - Calcular la velocidad en función de la línea de visión o "distancia inclinada", reduciendo así la influencia del error angular horizontal y vertical.

7. REFERENCIAS

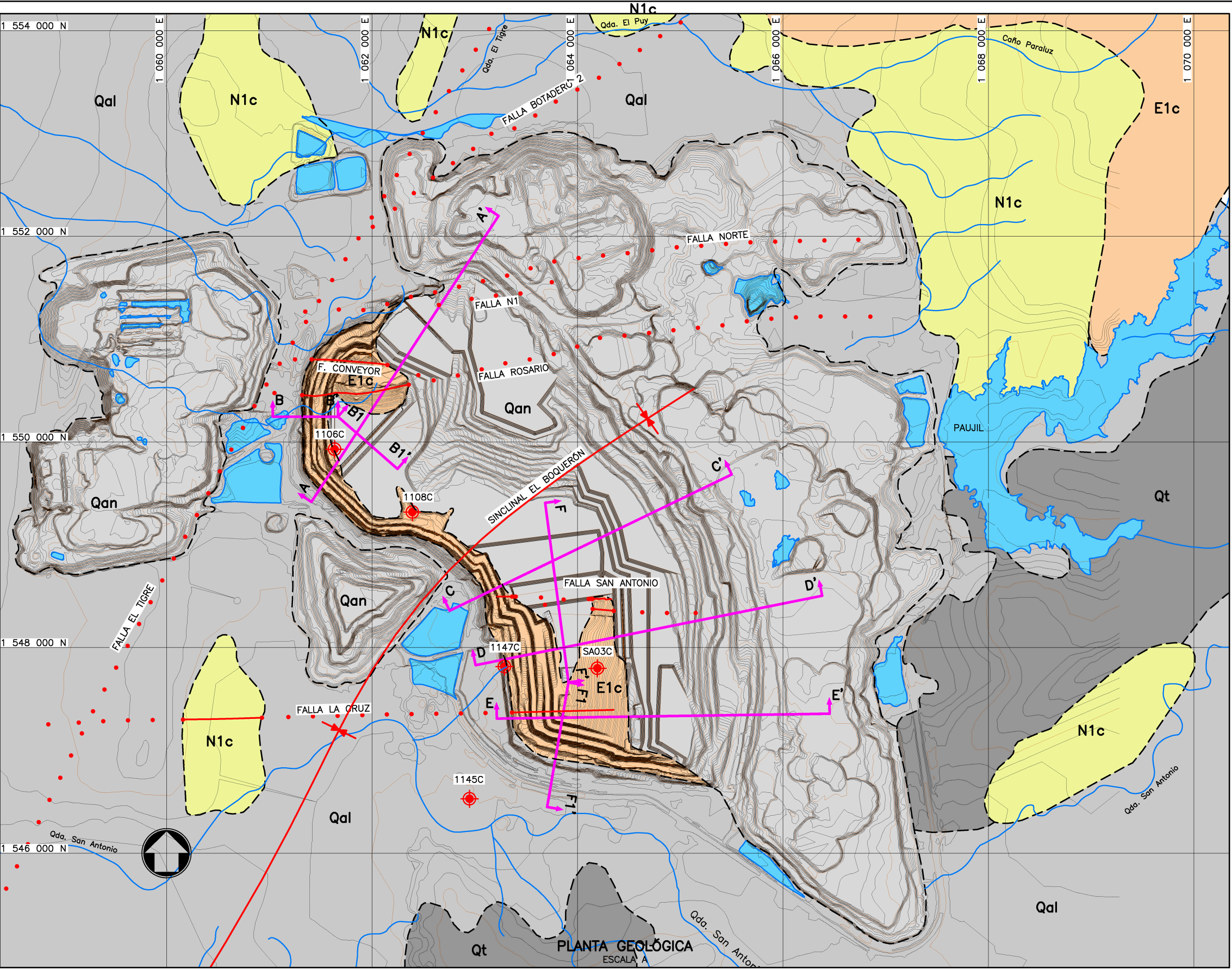
- ANLA, 2015. Términos de referencia modificación del plan de manejo ambiental del proyecto La Loma (LAM0027) y la licencia ambiental del proyecto El Descanso y Rincón Hondo (LAM3271) Drummond Ltd. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia.
- Cediél, F., Shaw, R. & Cáceres, C., 2003. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block in The Circum - Gulf of Mexico and the Caribbean; Hydrocarbon habitats, basin Formation, and plate tectonics. Denver, AAPG Memoria 79, p. 815 – 848.
- Cortés, M. & Angelier, J., 2005. Current states of stress in the northern Andean asindicated by focal mechanisms of earthquakes. Tectonophysics, Volumen 403, pp. 29 - 58.
- Duncan, J. M., 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 126(4), pp. 307-316.
- Duncan, J. M. & Wright, S. G., 2005. Soil strenght and slope stability. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Hernández, M., 2002. Geología de la Plancha 48 Jagua de Ibirico. Memoria explicativa. Bogotá: Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B., 2002. Hoek-Brown Failure Criterion 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto. Disponible en [http\\www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).

- Javankhoshdel, S. & Bathurst, R. J., 2014. Simplified probabilistic slope stability design charts for cohesive and cohesive-frictional (c- Φ) soils. Canadian Geotechnical Journal, 51(9), pp. 1033 - 1045.
- NSR-10, 2010. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.
- Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Modificación del plan de manejo ambiental del proyecto La Loma (LAM0027) y la licencia ambiental del proyecto El Descanso y Rincón Hondo (LAM3271). Sección 5.1.7. Geotecnia. (2015).
- Call & Nicholas Report. Geotechnical Study (2001). Drummond Ltd.
- Call & Nicholas Laboratory Testing Results. 2016 Drummond La Loma (2016). Drummond LTD. Reporte Final de Exploración Fase II. Contrato La Loma. Capítulo 2: Geología. Departamento de Geología DLTD (2006).
- Drummond Ltd. Reporte anual de Exploración 2007. Contrato La Loma. Departamento de Geología (2008).
- Drummond Ltd. Modificación Plan de Minería Contrato La Loma (2009).
- Drummond Ltd. Registros de perforación. Departamento de Geología (2016).
- Resultados para Drummond Ltd. Universidad de Los Andes. Pruebas de Laboratorio (2002).
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1987, Edit. 1), Manual de Taludes, serie Geotecnia.

- GONZALEZ DE VALLEJO. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson Editorial.
- DAS. Brajas M. (edit. 4) Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Capítulo 5, 10, 13.
- JORGE ARTURO CAMARGO PUERTO (2004). Manual de Geología estructural. Guía para la Interpretación y Elaboración de Mapas Geológicos.
- PEDRO RAMIREZ OYANGUREN. ET AL (2004). Mecánica de rocas, Fundamentos e Ingeniería de Taludes.
- HÉCTOR GERALDO MONTERO. (2011). Estabilidad de Taludes en Minería cielo abierto.
- CRUDEN, D.M., VARNES, D.J., (1996), Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75
- IRASEMA ALCANTARA AYALA. (1999). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del Terreno? Definición, clasificaciones y terminología.
- FORECASTING POTENTIAL SLOPE FAILURE IN OPEN PIT MINES - CONTINGENCY PLANNING AND REMEDIATION. Nick D. Rose and Oldrich Hungrb.
- LIBRO DESLIZAMIENTOS: ANÁLISIS GEOTÉCNICO. Jaime Suarez.

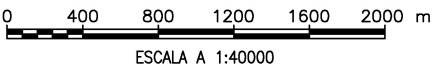
8. ANEXOS

ANEXO A: GEOLOGÍA



LEYENDA GEOLÓGICA	
Qan	Relleno Antrópico: Material heterogéneo producto del proceso de minado. Escombrera.
Qal	Depósito Aluvial: Arenas limos y arcillas cubiertos por un nivel delgado de gravas.
Qt	Depósito de Terraza: Constituido por gravas de areniscas silíceas, bloques y cantos calcáreos.
N1c	Formación Cuesta: Intercalaciones de conglomerados ferruginosos, limolitas y arcillolitas con areniscas deleznales y conglomeráticas.
E1c	Formación los Cuervos: Areniscas cuarzosas, arcosas, de grano fino, grises ferruginosas, con materia orgánica limolitas grises oscuras con materia orgánica, arcillolita shale carbonosa abigarrada con capas de carbón.

SÍMBOLOS	
---	Contacto geológico
---	Falla
...	Falla cubierta
---	Límite concesión La Loma
---	Drenaje
---	Sección
...	Perforación ejecutada.
---	Ponds



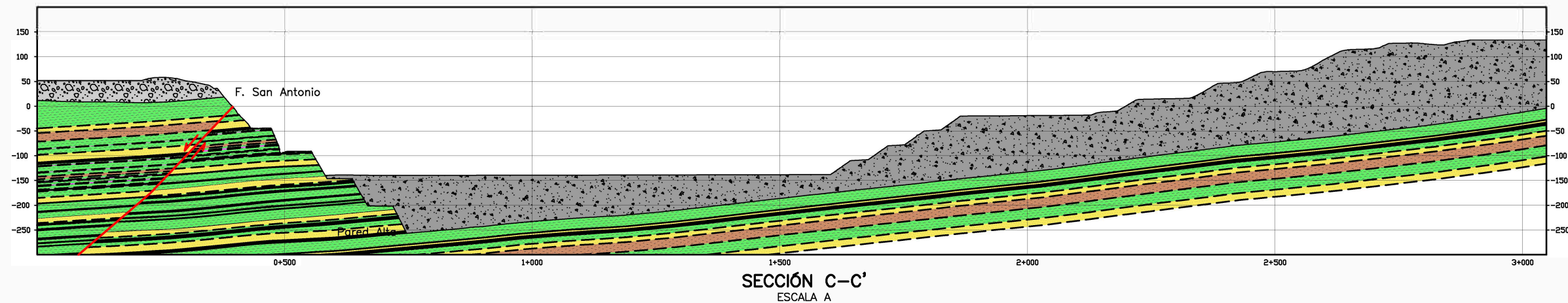
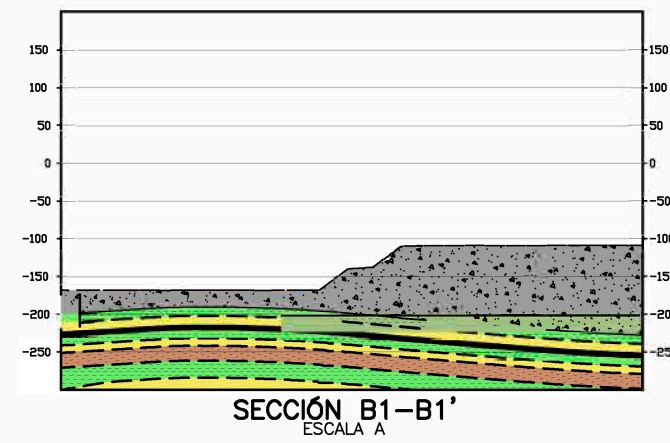
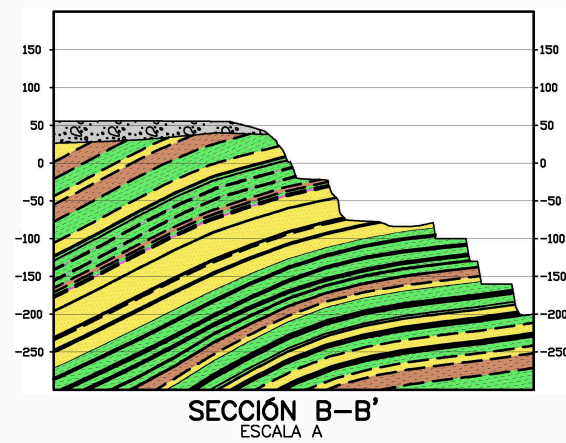
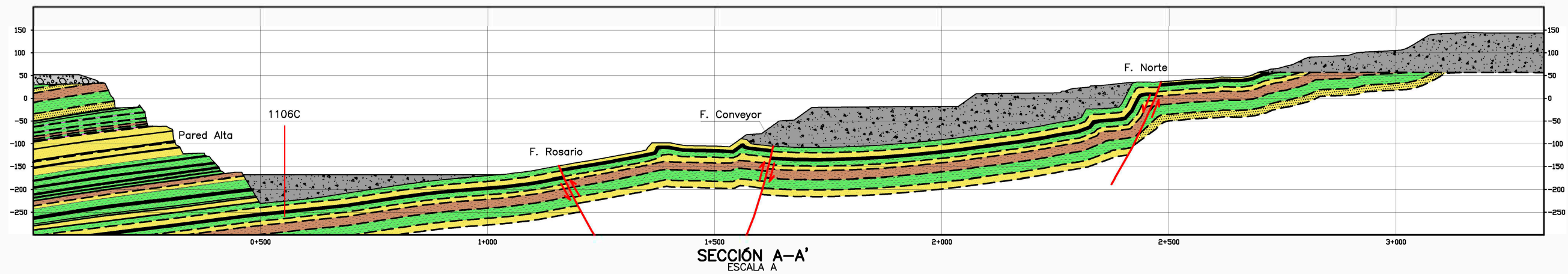
ACTUALIZACIÓN ESTUDIO GEOTÉCNICO MINA PRIBBENOW



FIGURA A1

PLANTA GEOLÓGICA

REV.0
JULIO, 2016



LEYENDA GEOLÓGICA	
	Relleno Antrópico (Escombrera)
	Depósito aluvial compuesto por gravas redondeadas en matriz arenosa fina-media.
	Arcillolitas.
	Areniscas de grano fino medio, gris claro a medio micáceas.
	Limolitas micáceas grises oscuras y carbonosas.
	Manto de arcilla.
	Mantos de carbón.
SÍMBOLOS	
	Perforación ejecutada.
	Falla inversa.
 ESCALA A 1:10000	



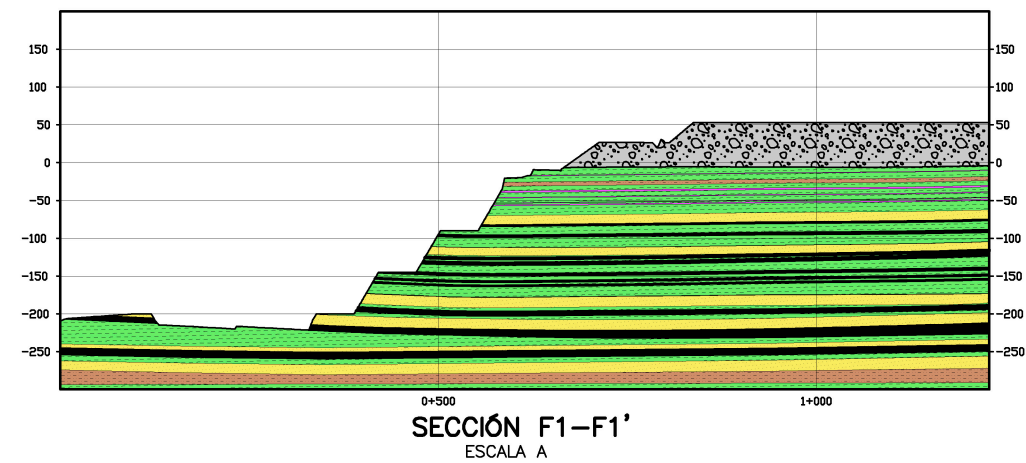
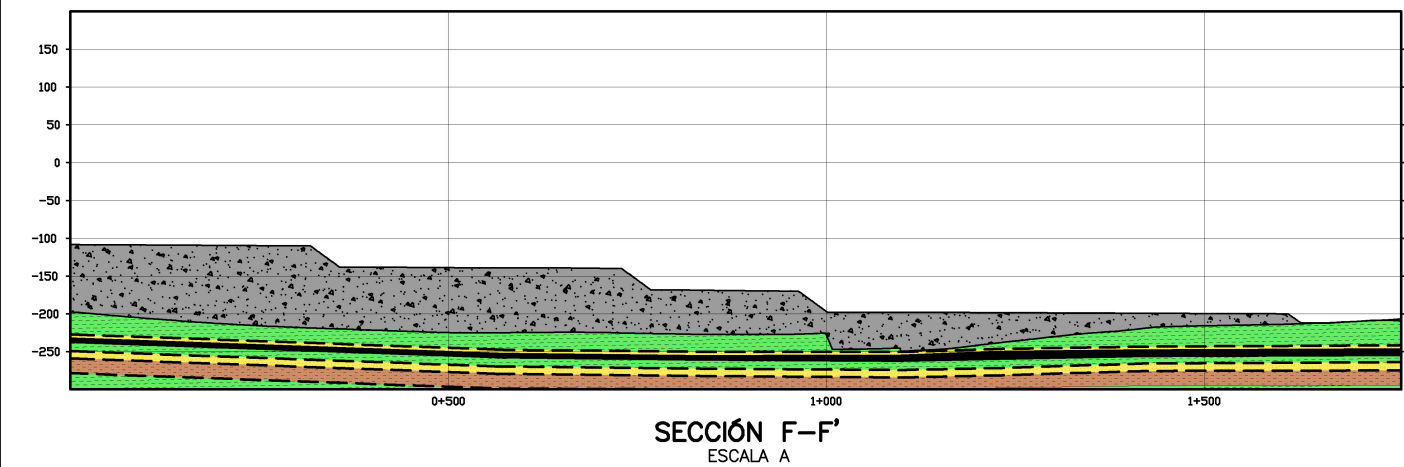
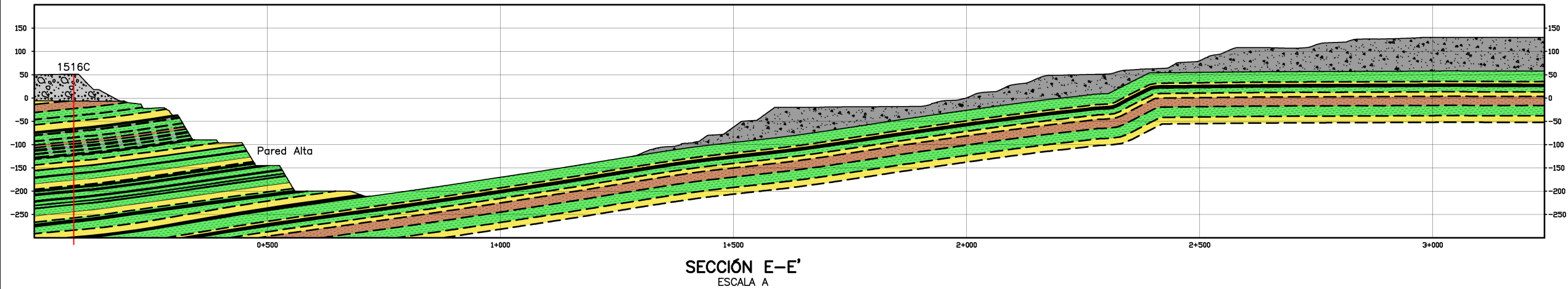
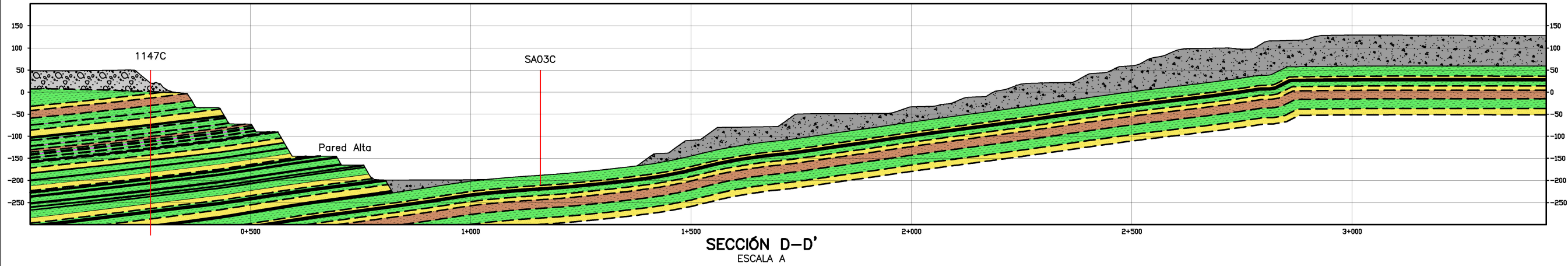
ACTUALIZACIÓN ESTUDIO GEOTÉCNICO MINA PRIBBENOW



FIGURA A2

SECCIONES GEOLÓGICAS

REV.0
JULIO, 2016



LEYENDA GEOLÓGICA	
	Relleno Antrópico (Escombrera)
	Depósito aluvial compuesto por gravas redondeadas en matriz arenosa fina-media.
	Arcillolitas.
	Areniscas de grano fino medio, gris claro a medio micáceas.
	Limolitas micáceas grises oscuras y carbonosas.
	Manto de arcillita.
	Mantos de carbón.

SÍMBOLOS	
	Perforación ejecutada.
	Falla inversa.

0 100 200 300 400 500 m

ESCALA A 1:10000



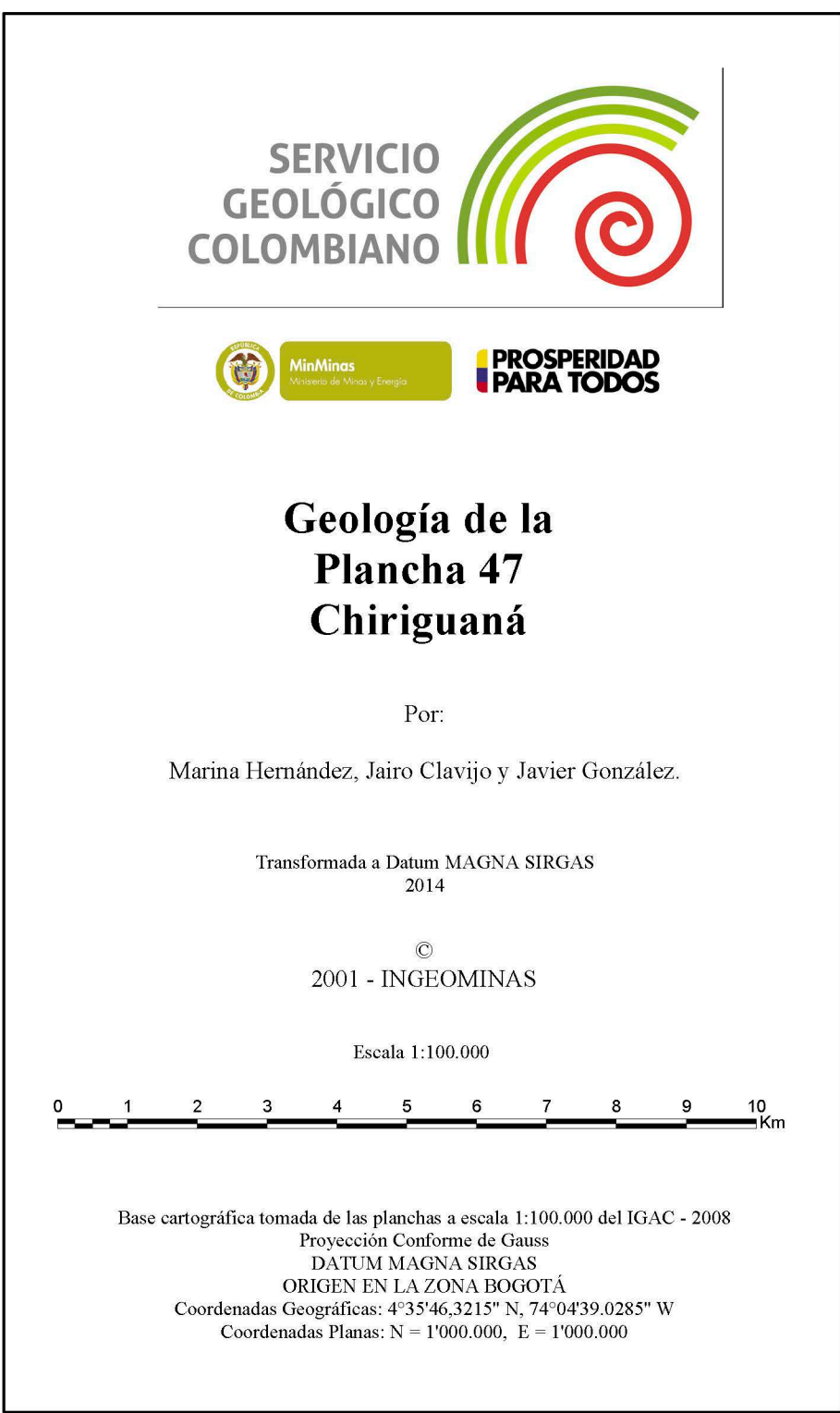
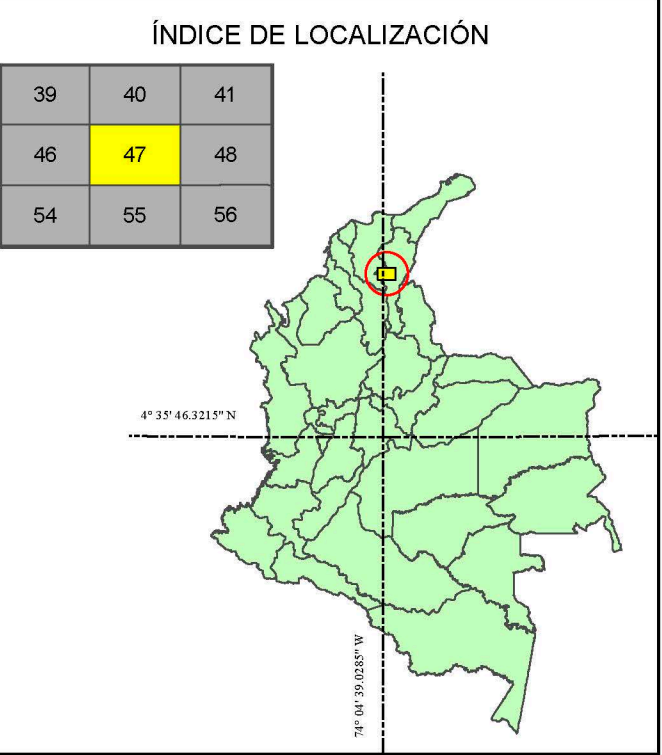
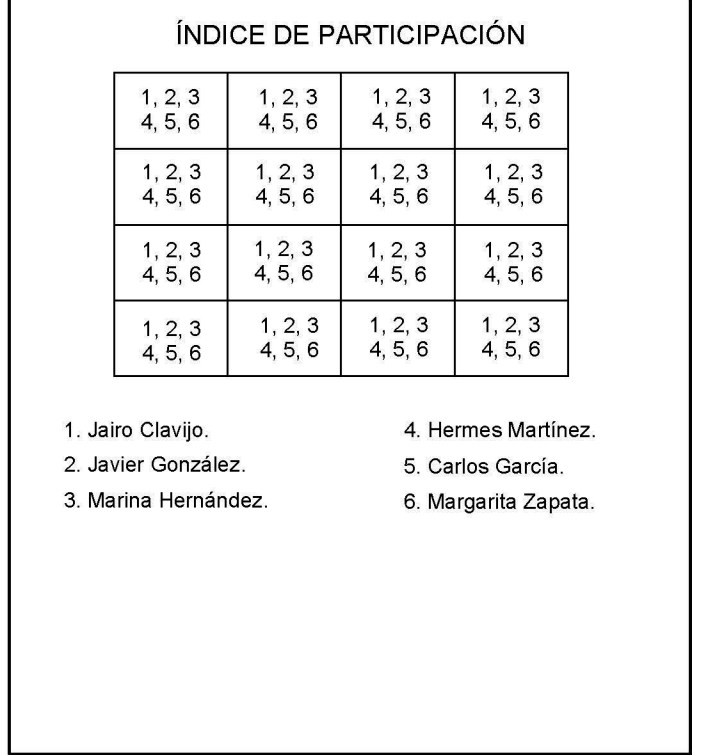
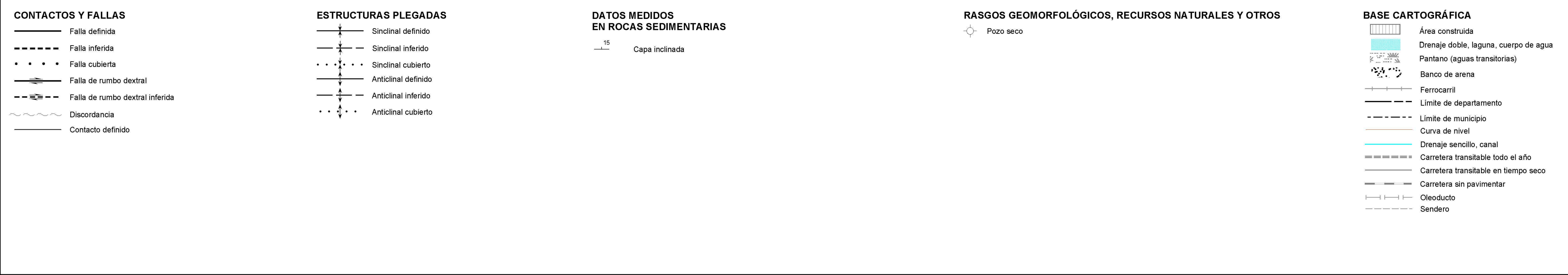
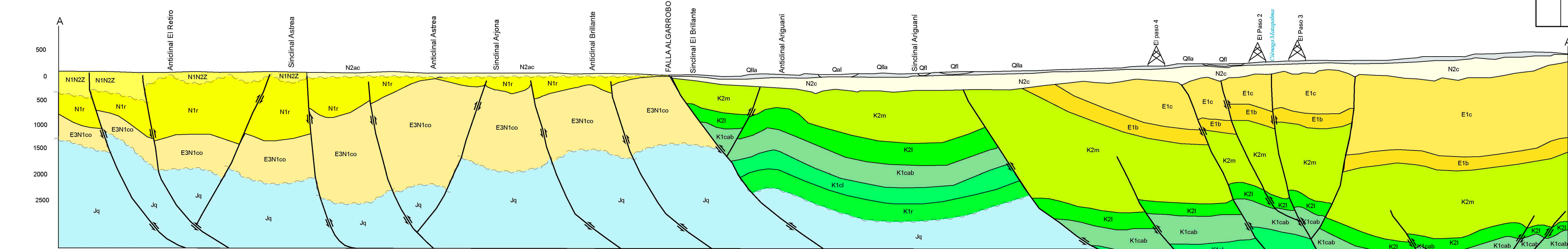
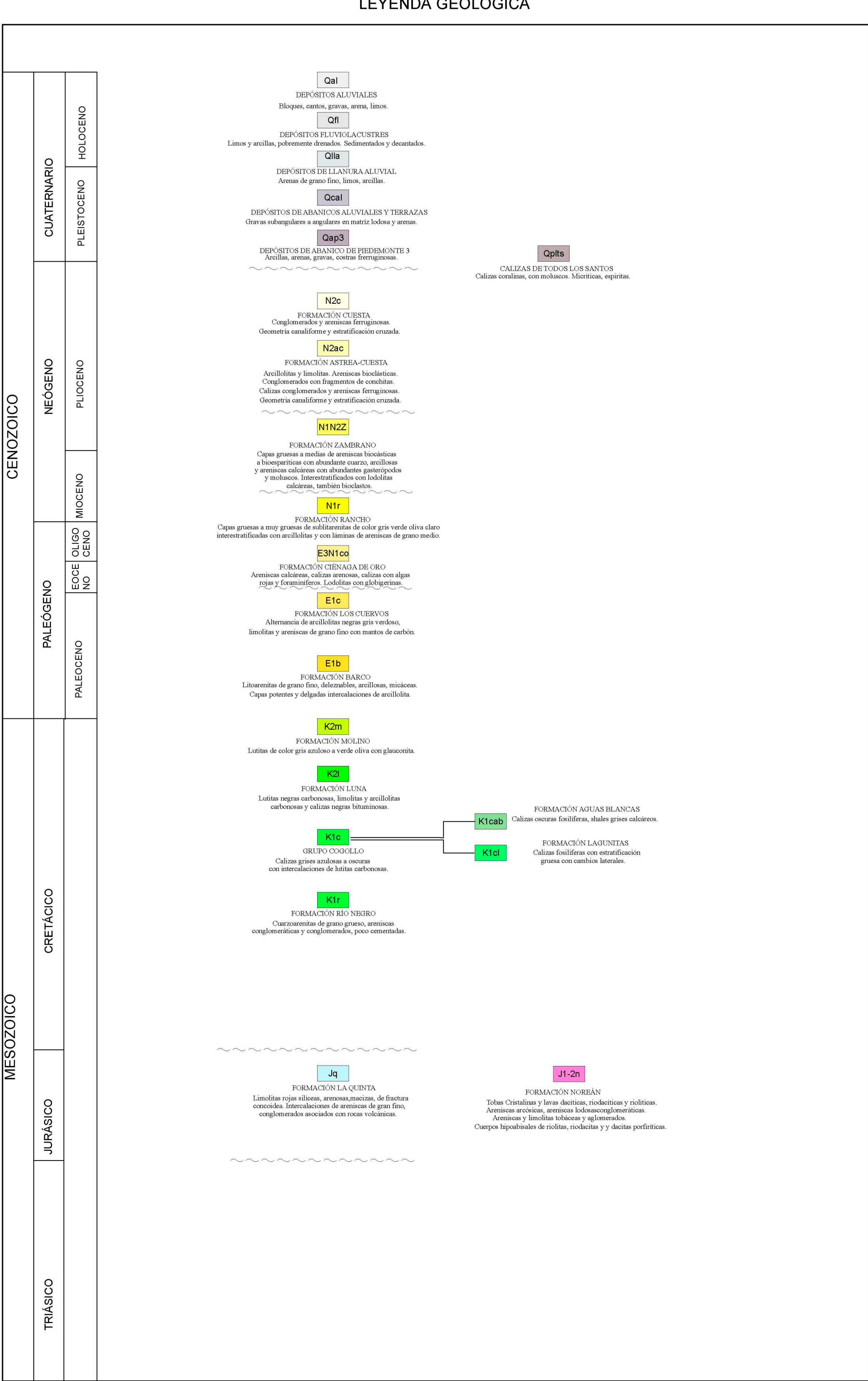
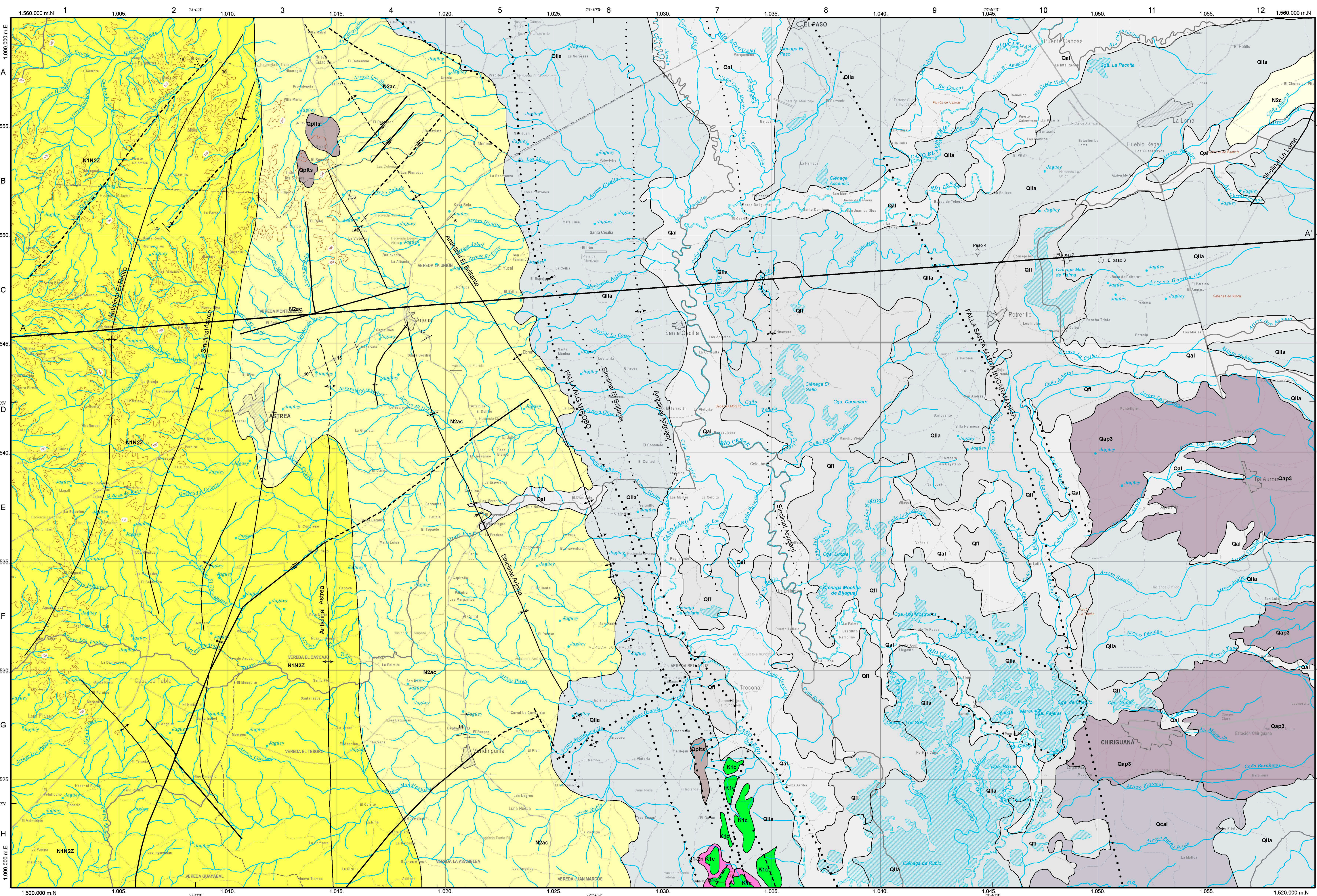
ACTUALIZACIÓN ESTUDIO GEOTÉCNICO MINA PRIBBENOW

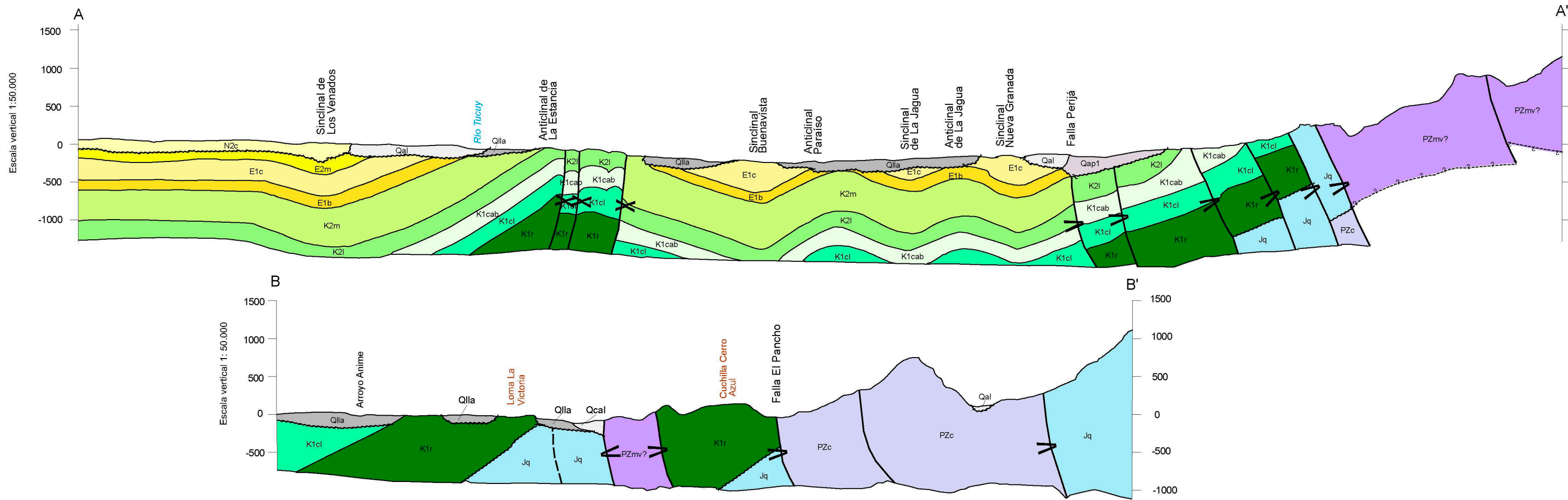


FIGURA A3











SECCIONES GEOLÓGICAS

REV.0
JULIO, 2016





BASE CARTOGRÁFICA

-  Área construida
-  Drenaje doble, laguna, cuerpo de agua
-  Carretera
-  Carretera transitable todo el año
-  Carretable
-  Sendero
-  Límite de municipio
-  Límite de Nación
-  Curva de nivel
-  Drenaje sencillo, canal

ÍNDICE DE LOCALIZACIÓN

40	41	42
47	48	
55	56	57

40°36'N
2°22'W

Qal
Depósitos aluviales
Bloques, cantos, gravas, arenas y limos.

Qlla
Depósitos de llanura aluvial
Arenas de grano fino, limos y arcillas.

Qcal
Depósitos de abanicos aluviales y terrazas
Gravas subangulares a angulares en matriz lodosa con laberización de hierro y manganeso.

Qap3
Depósitos de abanico de piedemonte 3
Arcillas, arenas y gravas.

Qap2
Depósitos de abanico de piedemonte 2
Arenas, gravas, arcillas y cantos ferruginosos.

Qap1
Depósitos de abanico de piedemonte 1
Gravas, arenas y arcillas.

Qa
Terrazas
Bloques, cantos, gravas y arenas
en matriz arcillo limosa.

Nz
Formación Guesta
Conglomerados y areniscas ferruginosas. Geometría canaliforme y estratificación cruzada.

E2m
Formación Mirador
Areniscas de cuarzo blancas y amarillentas de grano medio y conglomeráticas.

E1c
Formación Los Cuervos
Arcosas a subarcosas de grano fino, grises, ferruginosas, mudosas y con materia orgánica. Limitadas por gruesas calcas con fractura originadas por fallas. Shales carbonosas, agrietadas y capas de carbón de 6 cm a 15 cm de espesor.

E1b
Formación Barco
Areniscas amarillentas de grano fino, con estratificación cruzada y alternación y terminación plana paralela continua con intercalaciones de arcillitas.

K2m
Formación Molino
Shales de color gris azulado a verde oliva con glauconita.

K2l
Formación La Luna
Lutitas negras carbonosas, limolitas y arcillolitas carbonosas y calizas negras bituminosas.

K1c
K1cab
Formación Aguas Blancas
Shales carbonosas con concreciones calcáreas.
Areniscas calcáreas de grano fino. Calizas lumulicoides.

K1cd
Formación Lagunitas
Calizas fossilíferas en capas gruesas.

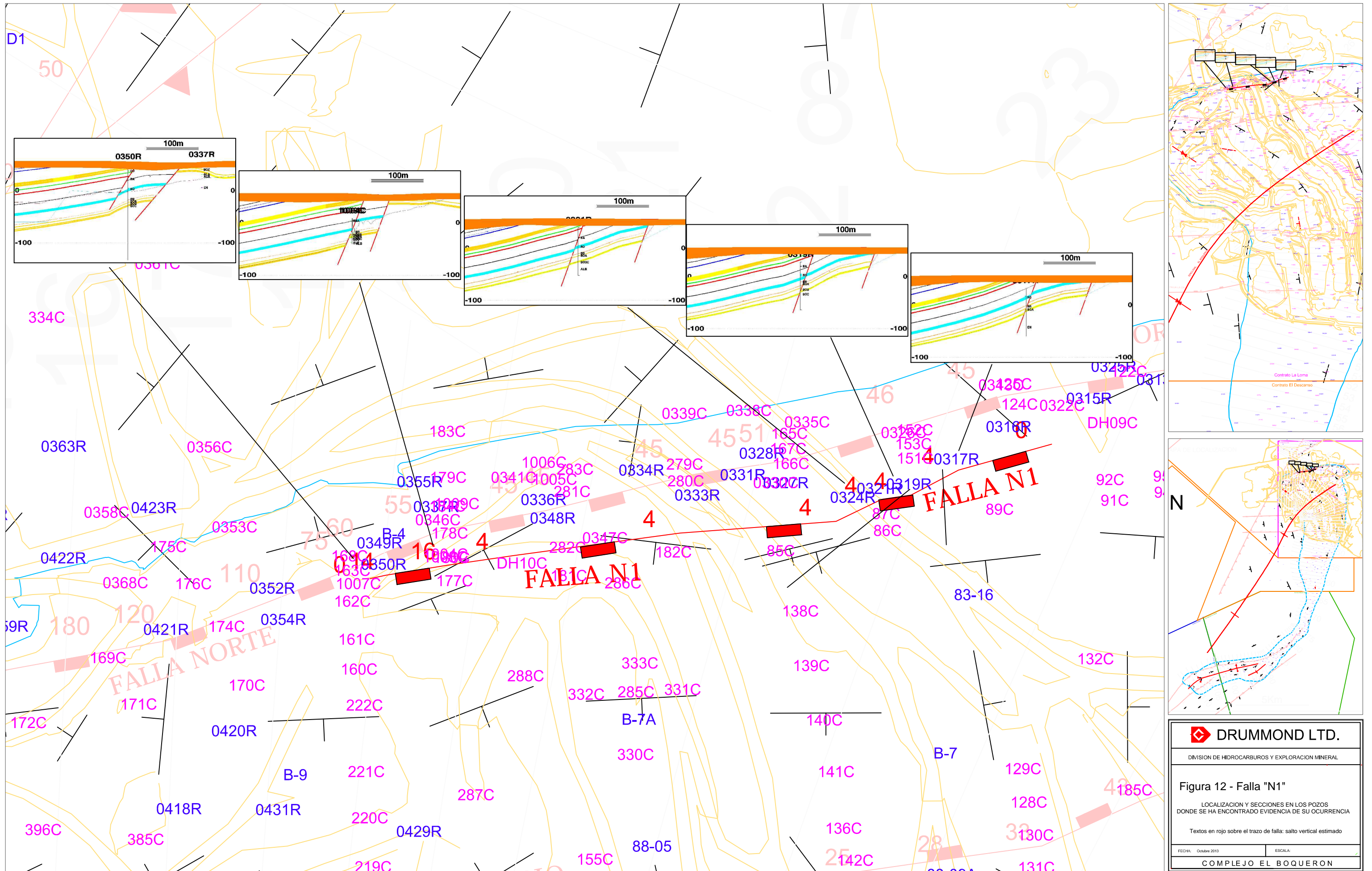
K1r
Formación Río Negro
Cuarzo arenitas a calcareas con intercalaciones de calizas carbonosas.

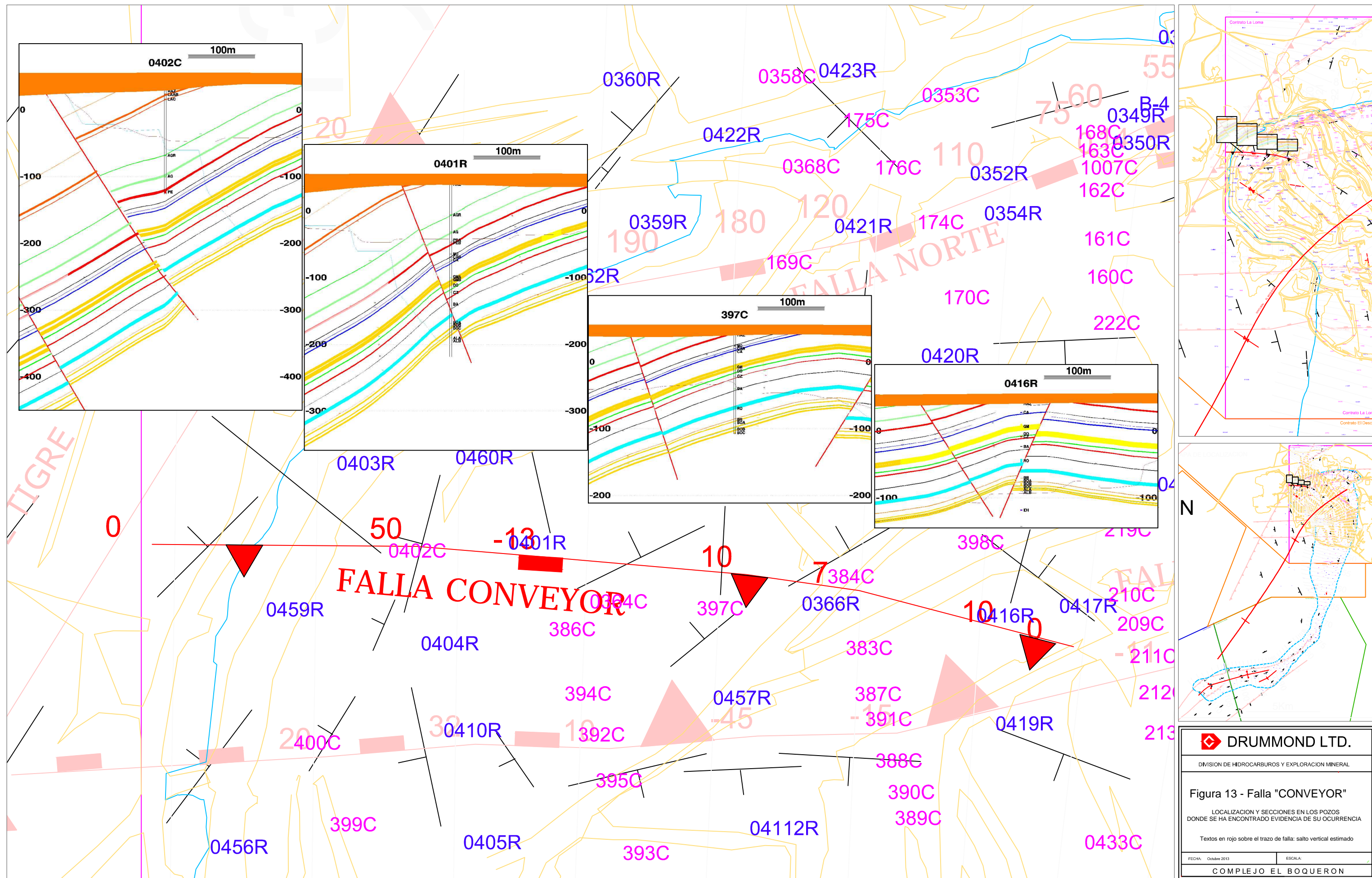
J1
Formación La Quinta
Sublitolarenitas de grano fino a medio, sublitolarenitas conglomeráticas con intracasos de limolitas rojas, intercaladas con limolitas gris verdosas y ripple con fractura concoidal. Arcositos están rosas volcánoclasticas.

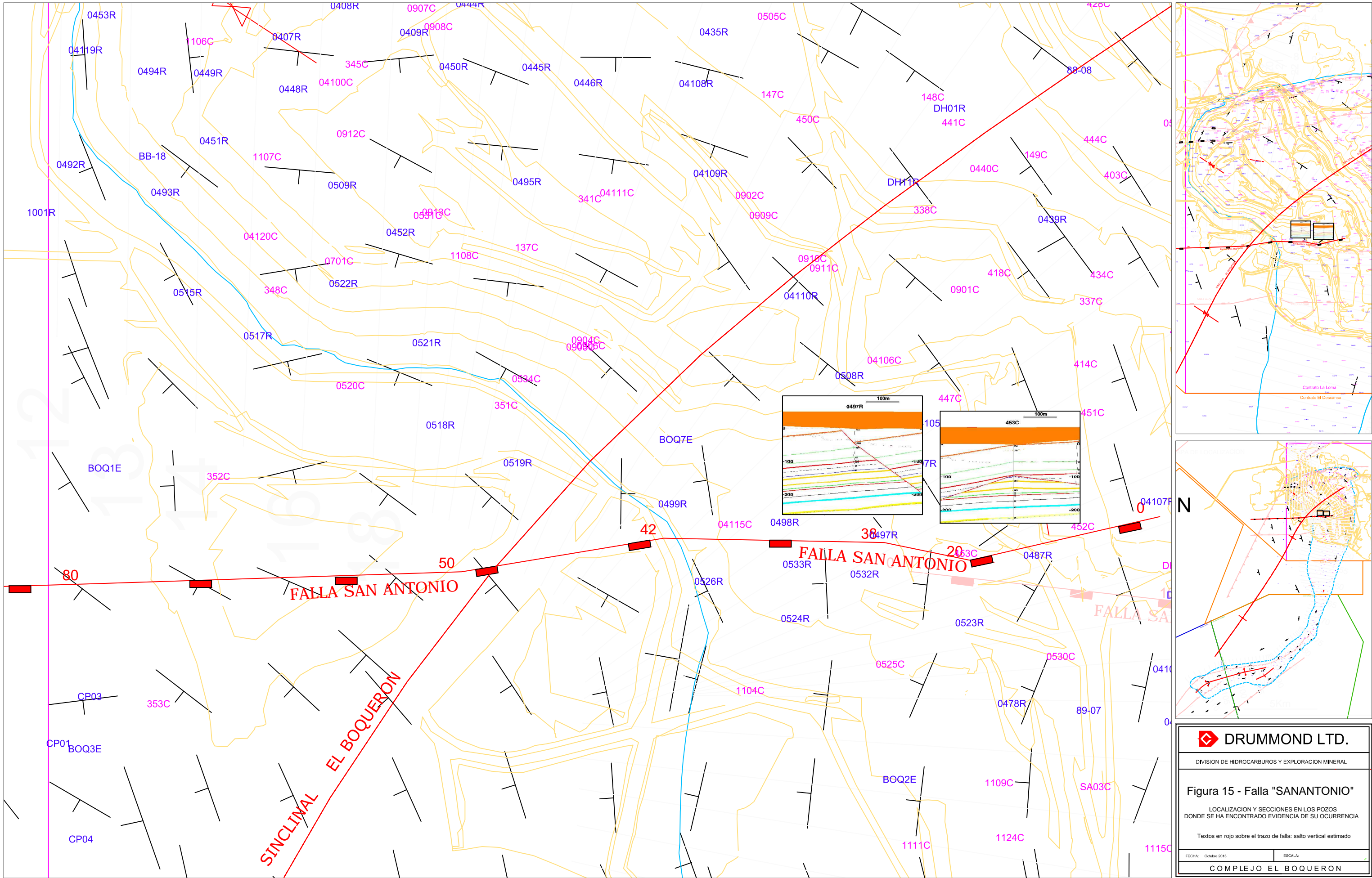
PZc
Grupo Cachirí
Conglomerado basal, suprayado por una secuencia alternante de areniscas ferruginosas, areniscas arcilomudosas y lutitas arenoclasticas.

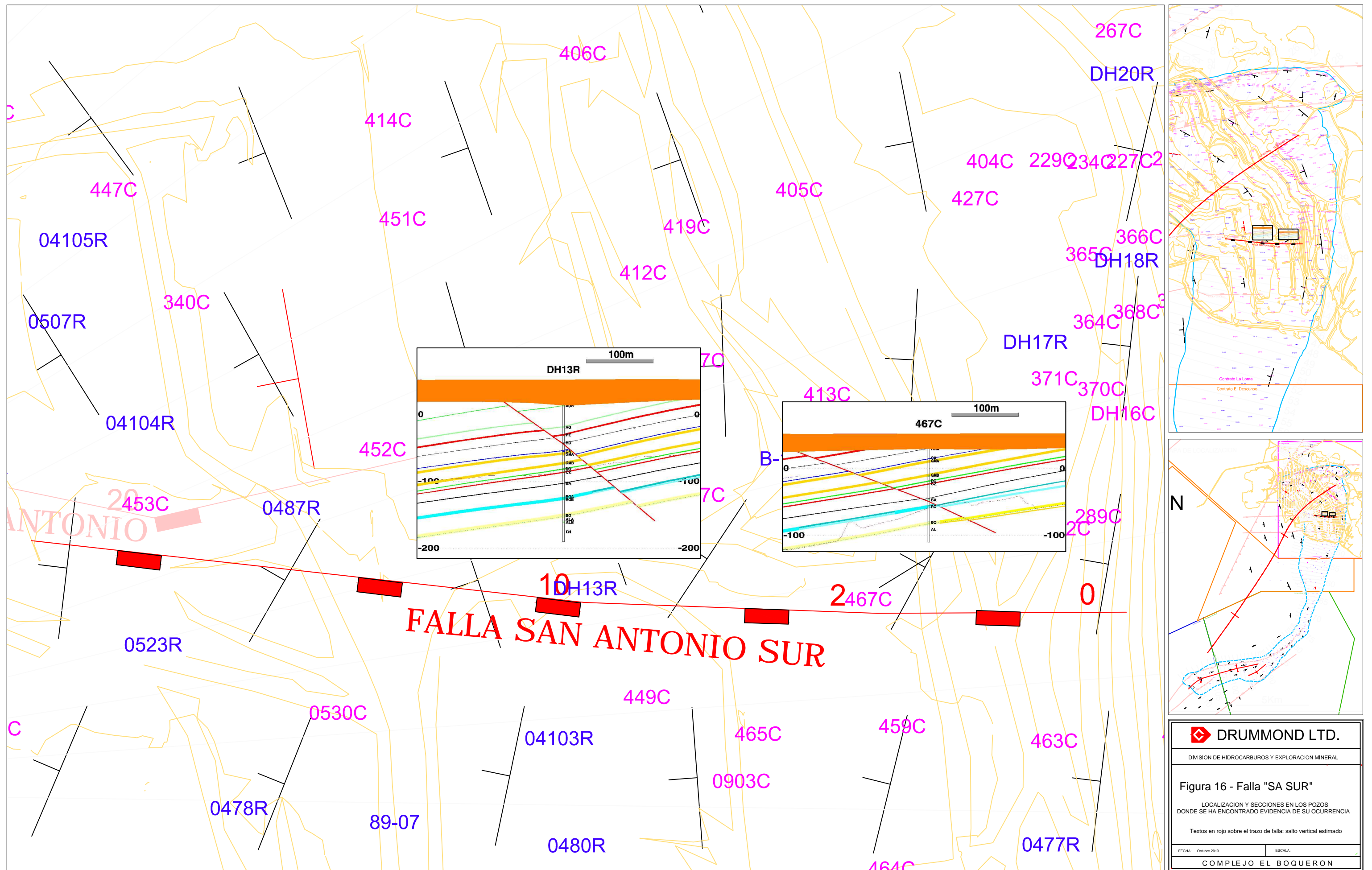
PZmf
Unidad Metasedimentaria de La Virgen
Rozas sedimentarias que han sido afectadas por metamorfismo regional de bajo a muy bajo grado, dispuestas en capas delgadas y medianas, metarenitas grises, metárcillas, metacalcas, metaconglomerados y, en menor proporción, filitas.

cartográfica tomada de las planchas a escala 1:100.000 del IGAC - 2008
Proyección Conforme de Gauss
DATUM MAGNA SIRGAS
ORIGEN EN LA ZONA BOGOTÁ
Coordenadas Geográficas: 4°35'46.3215" N, 74°04'39.0285" W
Coordenadas Planas: N = 1'000.000, E = 1'000.000









 **DRUMMOND LTD.**

DIVISION DE HIDROCARBUROS Y EXPLORACION MINERAL

Figura 16 - Falla "SA SUR"

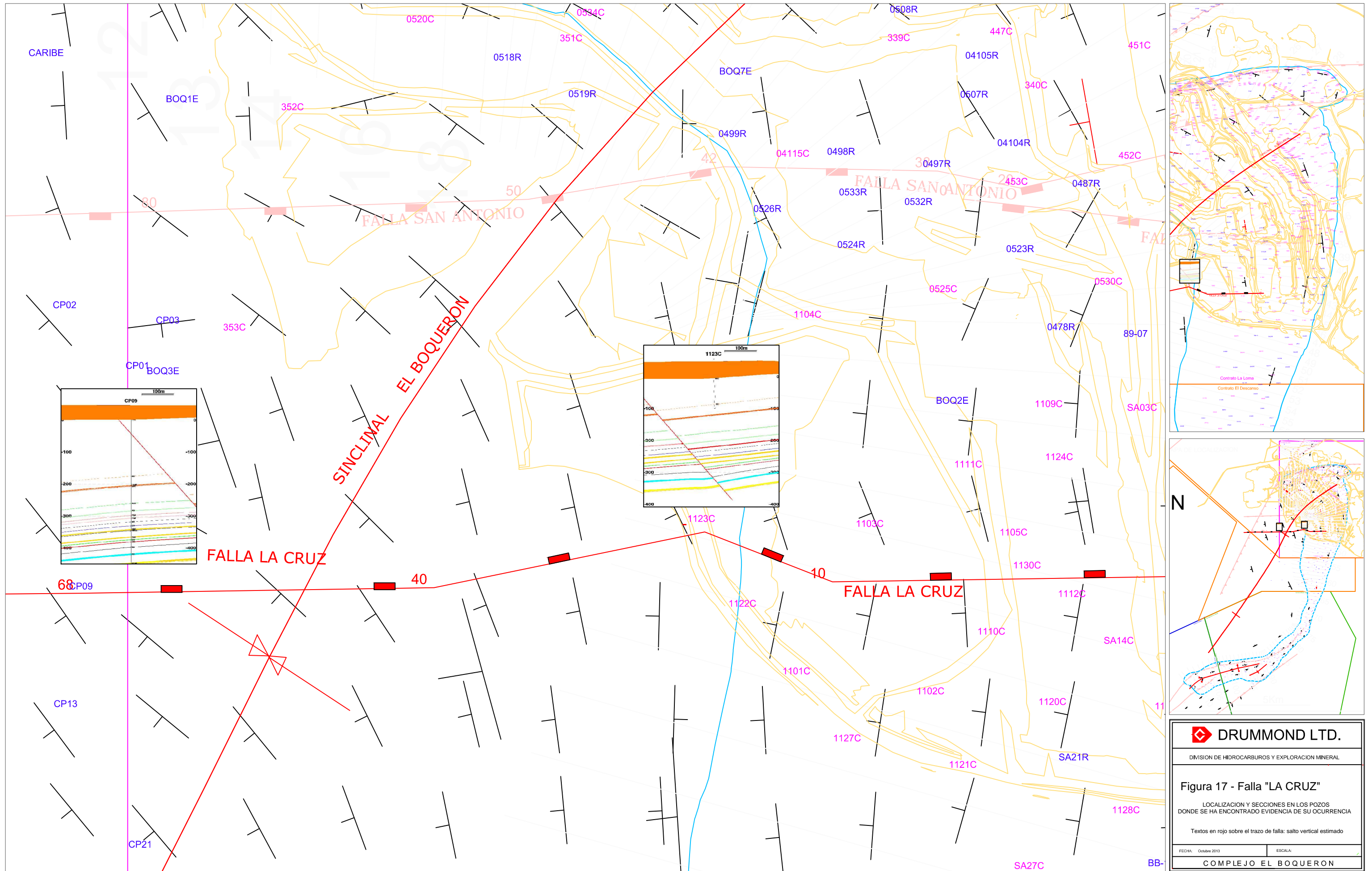
LOCALIZACION Y SECCIONES EN LOS POZOS
DONDE SE HA ENCONTRADO EVIDENCIA DE SU OCURRENCIA

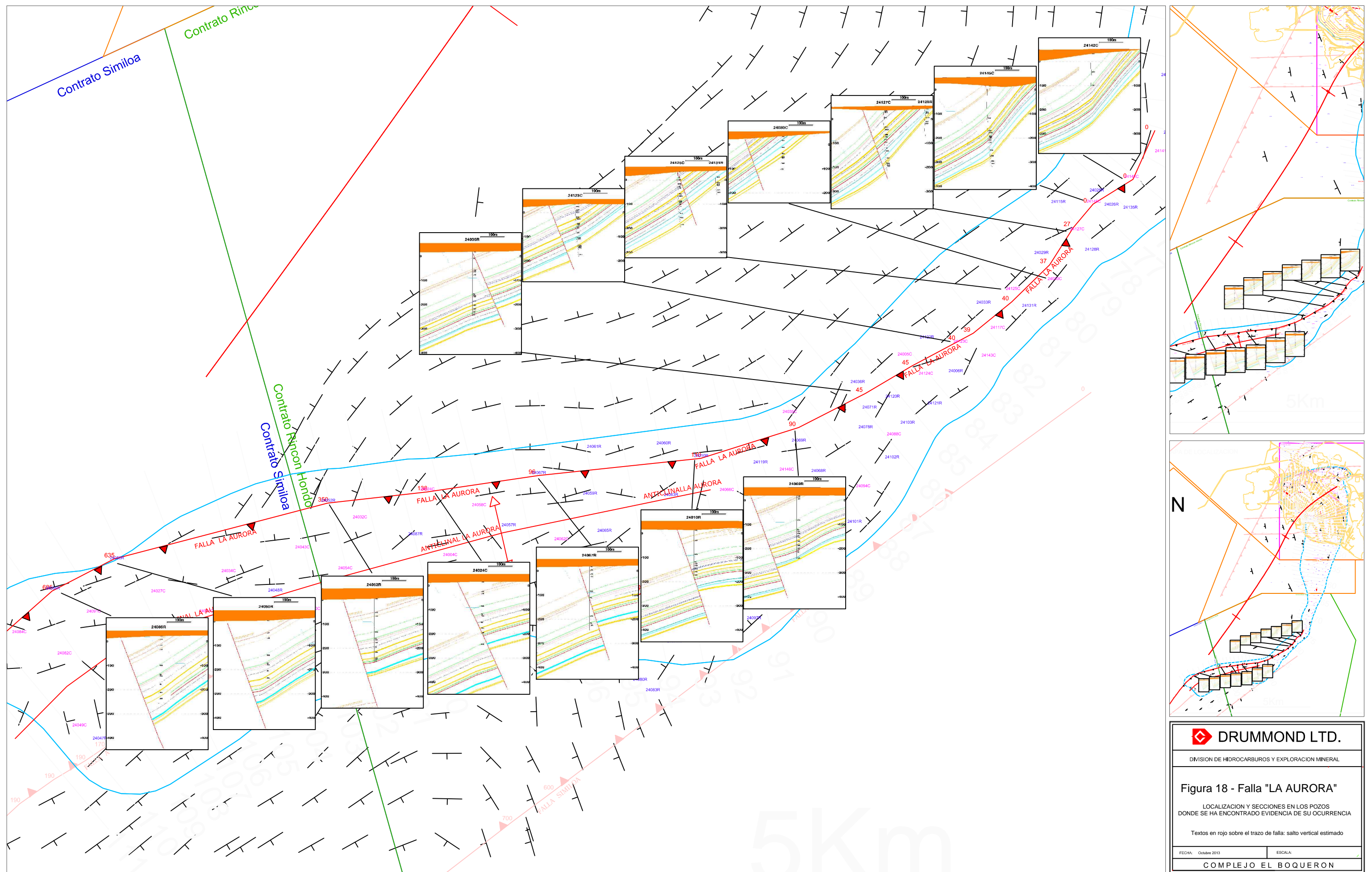
Textos en rojo sobre el trazo de falla: salto vertical estimado

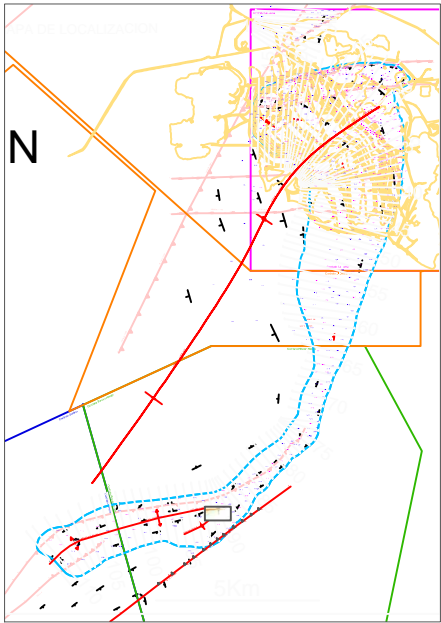
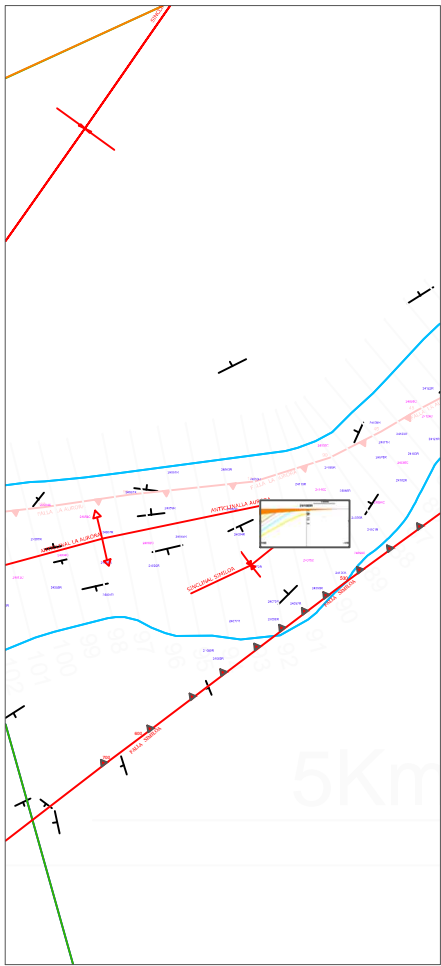
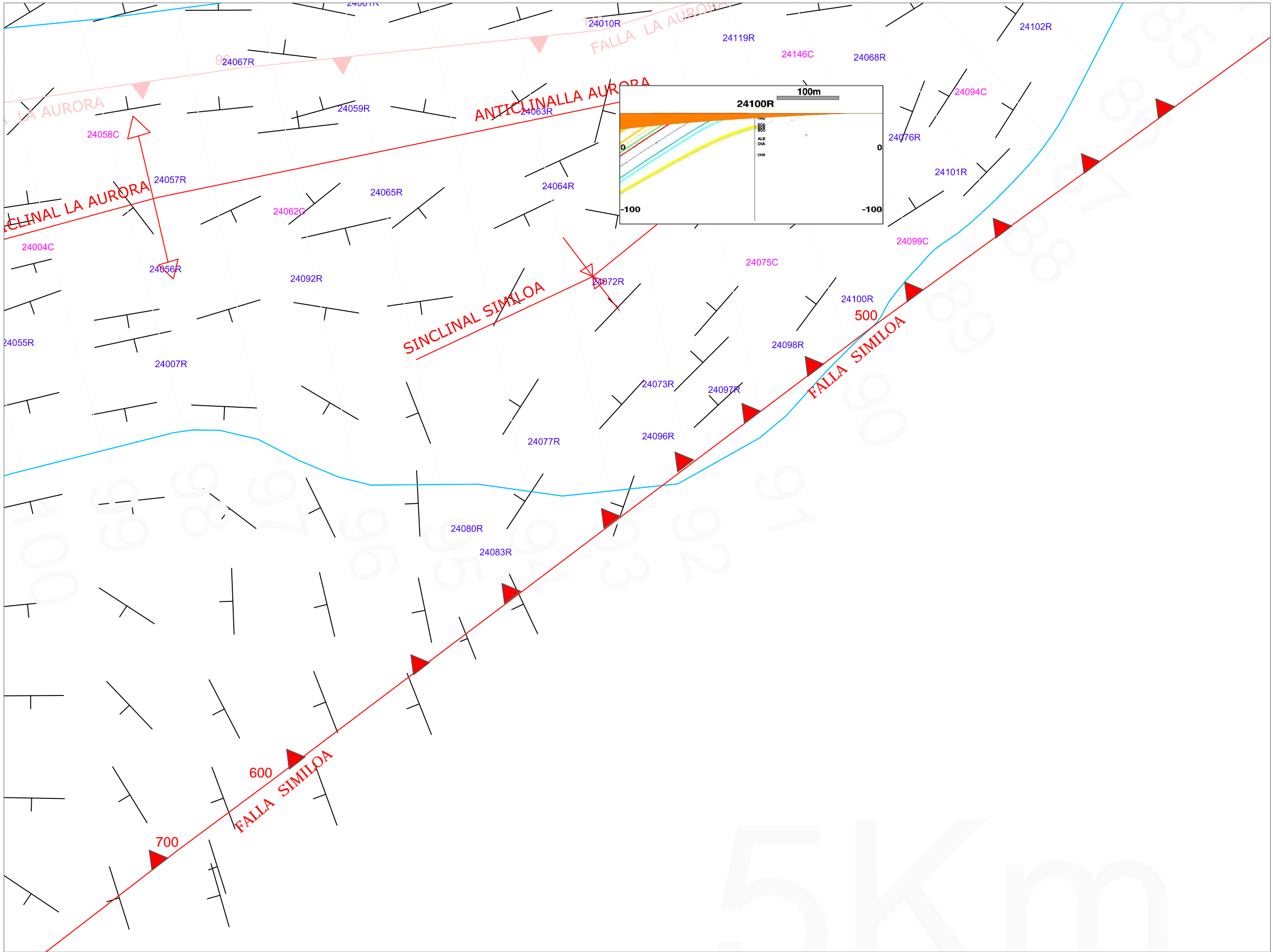
FECHA: Octubre 2013

ESCALA:


















COMPLEJO EL BOQUERON



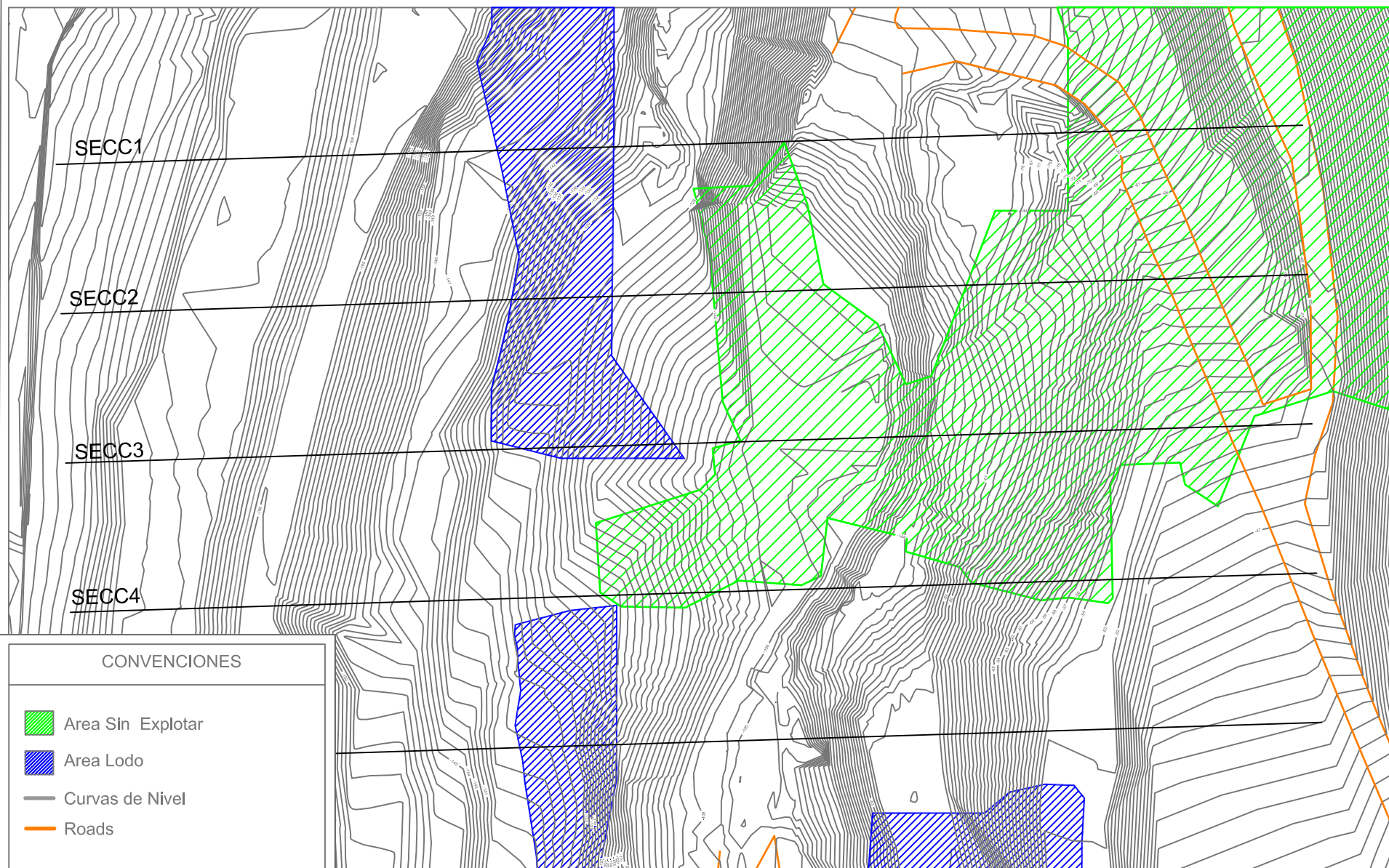




 DRUMMOND LTD.	
DIVISION DE HIDROCARBUROS Y EXPLORACION MINERAL	
Figura 19 - Falla "SIMILOA"	
LOCALIZACION Y SECCIONES EN LOS POZOS DONDE SE HA ENCONTRADO EVIDENCIA DE SU OCURRENCIA	
Textos en rojo sobre el trazo de falla: salto vertical estimado	
FECHA: Octubre 2013	ESCALA:
COMPLEJO EL BOQUERON	

CONVENCIONES ESPECÍFICAS			Manto La Loma		Manto Perico		Manto Gran Madre A		Manto Cazador		Manto Borrego Rider		Pozos de Perforación Geológica		Aluvial								
			Manto Aguila Rider		Manto Monito		Manto Gran Madre B		Manto Babilla		Manto Borrego												
			Manto Aguila		Manto Caballero		Manto Doncella		Manto Rouzaund		Línea de Corte												
Nombre del mapa				Cortes Geológicos Sinclinal el Boquerón						Escala gráfica:						Escala:		1:10'000					
Número del título:		Modificación Plan de Minería: Contrato La Loma 078-88, Contrato Descanso Sector Sur 144-97, Contrato Rincón Hondo 284-95, Contrato Similóa 283-95				Tipo de título:		Contrato Minero		Vereda:		NI		Municipio:		Chiriguaná, La Jagua de Ibirico, El Paso		Departamento:		Cesar			
Nombre del titular:						Drummond LTD						Nombre de la mina:						Operación Integrada Sinclinal El Boquerón					
Fecha:		23 / 03 / 2015		Plano:		4 de 6		Elaboró:		Departamento de Geología				Observaciones:									

ANEXO B: GEOTÉCNIA





SECC1

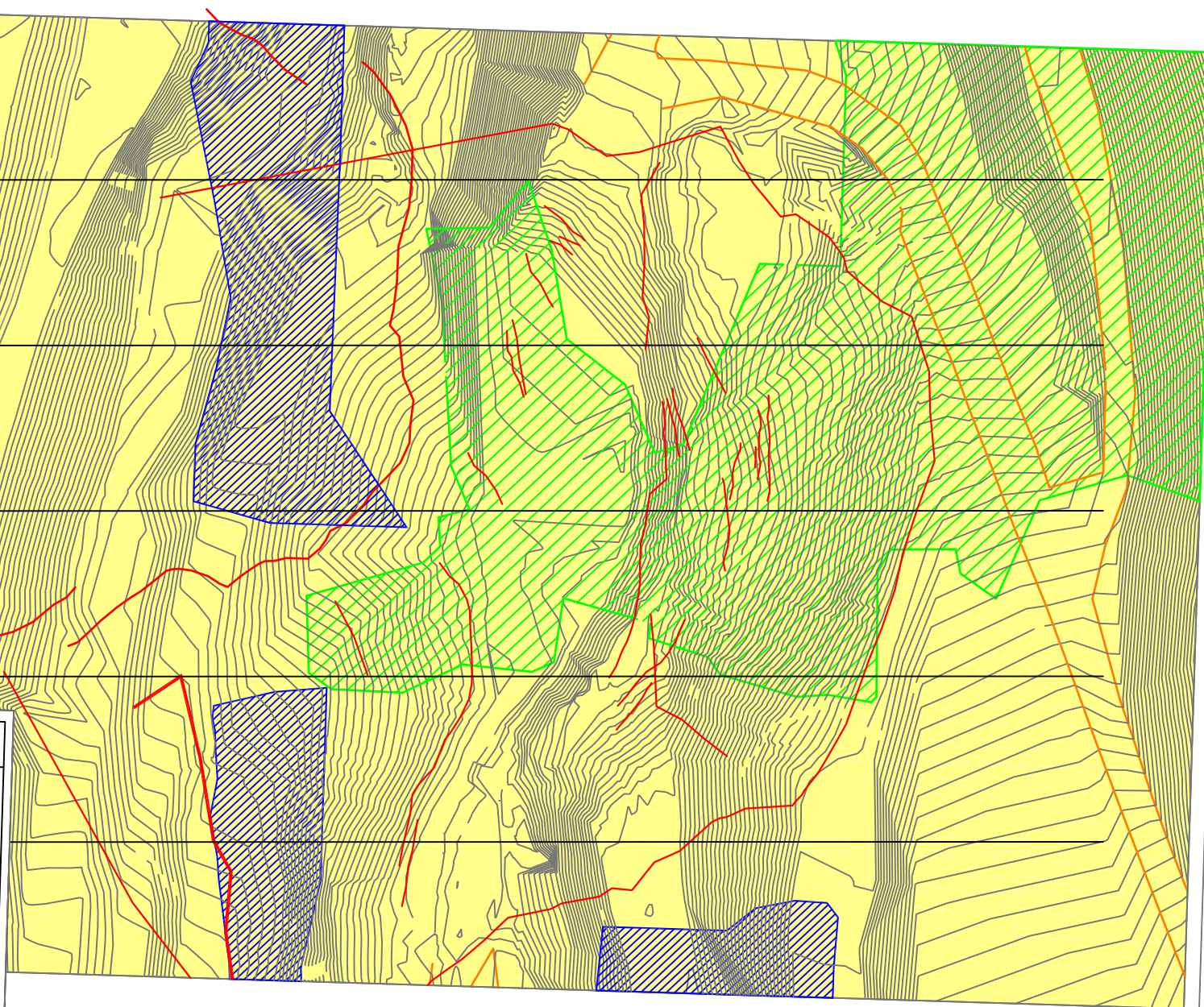
SECC2

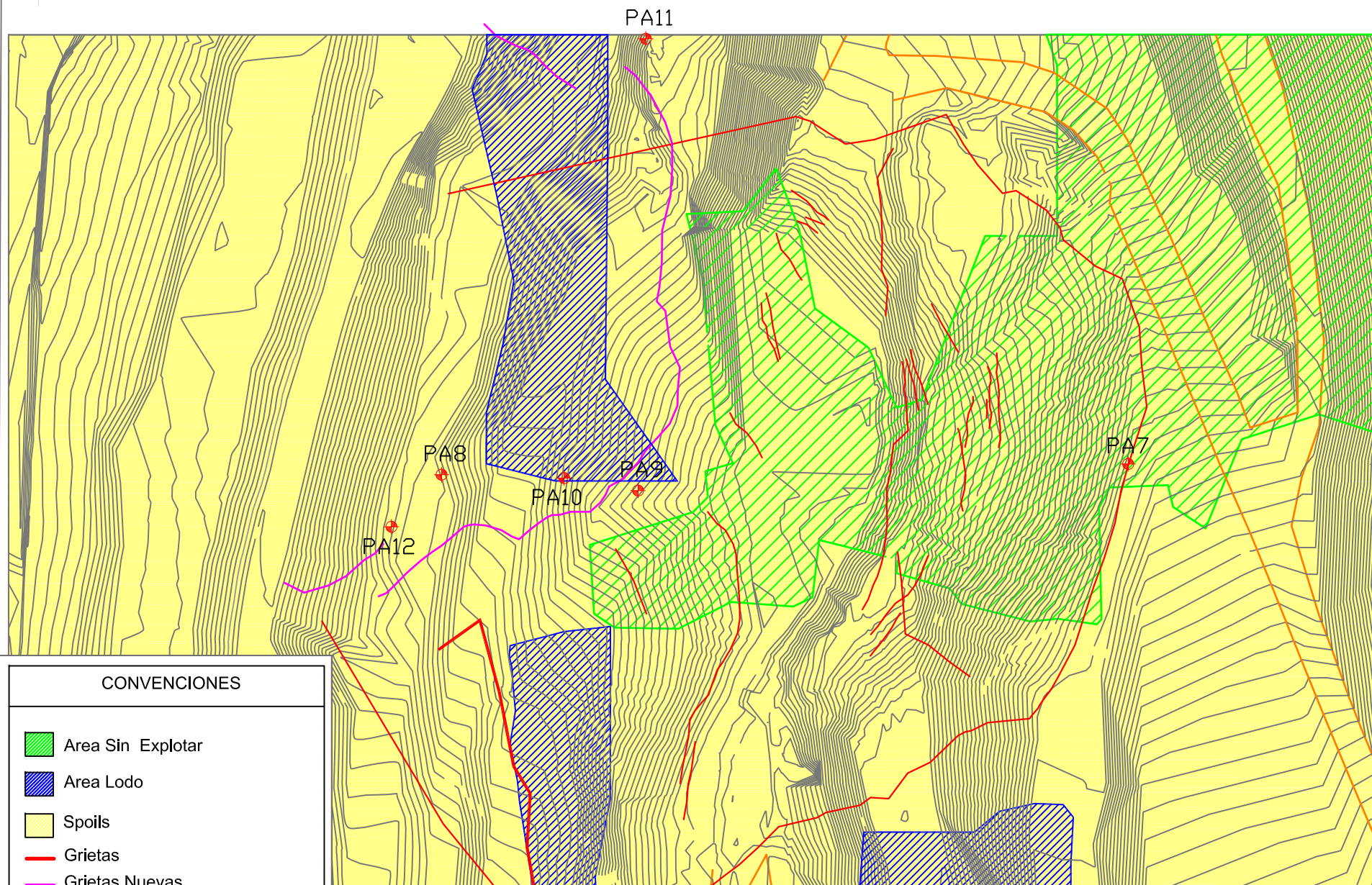
SECC3

SECC4

CONVENCIONES

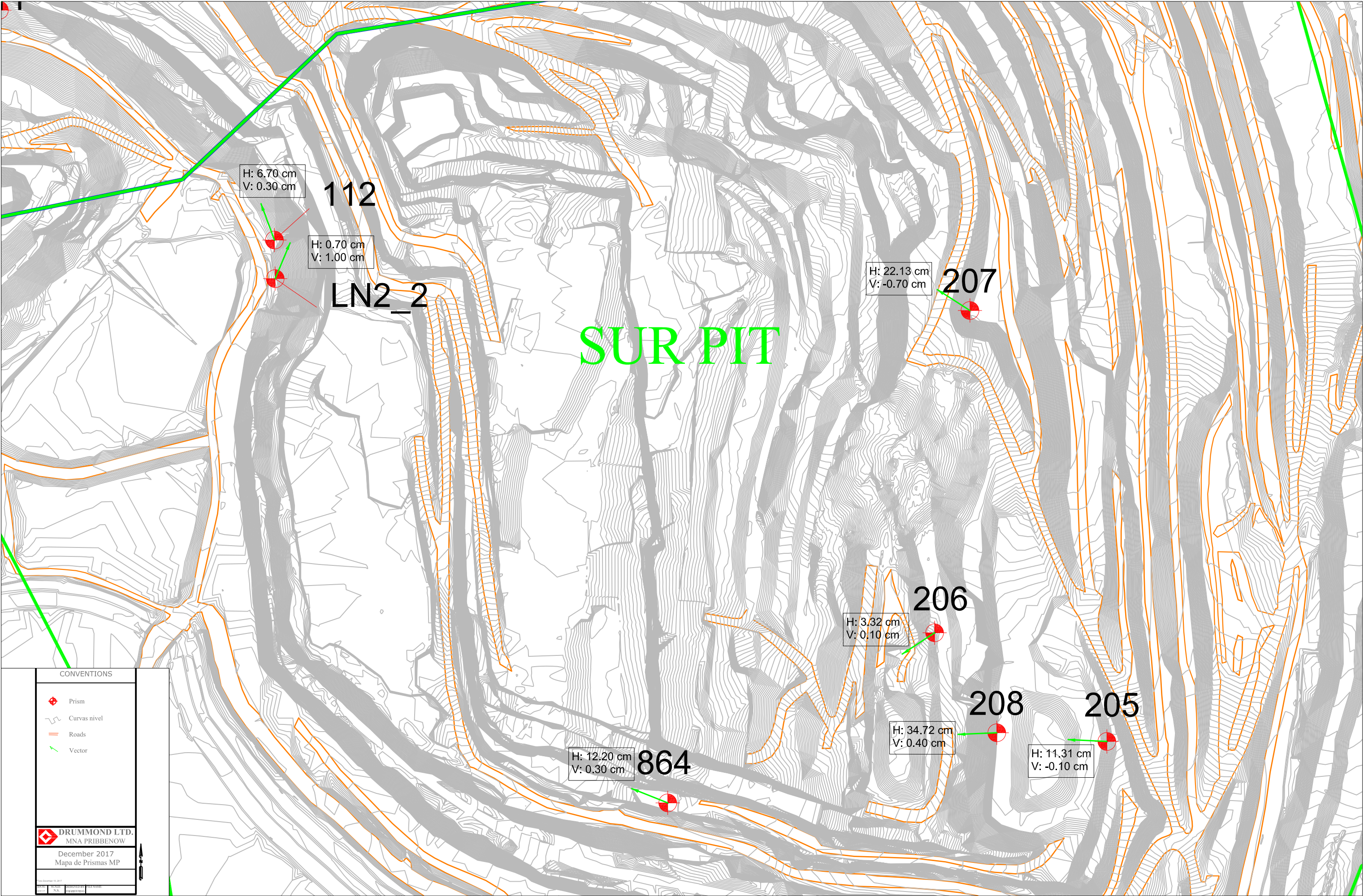
-  Area Sin Explotar
-  Area Lodo
-  Spoils
-  Grietas
-  Curvas de Nivel
-  Roads





CONVENCIONES

-  Area Sin Explotar
-  Area Lodo
-  Spoils
-  Grietas
-  Grietas Nuevas
-  Roads
-  Curvas de Nivel





**DRUMMOND
LTD.**

Parte 1:

REPORTE MONITOREO DE TALUDES MINA PRIBBENOW AREA SUR

Pit Sur

Este reporte presenta el análisis de los datos tomados entre 27-Aug-17 y el 31-Jan-18

Número de puntos: 6

ALARMAS Y RECOMENDACIONES

Tabla 1: Desplazamientos

Prisma	Material	Días	ΔH (cm)	H Dir (°)	ΔZ (cm) ↓(-)	Inclina. (°)	Δ (cm)	Movimiento*
PA8	Estéril	48	1586.95	298NW	1.00	43°	1593.12	LENTO
PA9	Estéril	41	76.15	324NW	0.30	20°	80.67	LENTO
PA10	Estéril	110	59.35	296NW	1.30	36°	63.26	LENTO
PA11	Estéril	76	9.02	283NW	0.30	18°	11.18	LENTO
PA12	Estéril	102	124.95	272NW	-1.10	-38°	141.49	LENTO
PA7	Estéril	168	151.59	283NW	-1.20	-27°	176.35	LENTO

*Clasificación de velocidad según Cruden y Varnes, 1996. (D = Desplazamiento total; DZ = Desplazamiento vertical; DH =Desplazamiento horizontal; H Dir = Dirección en planta)

Tabla 2: Alarmas

Prisma	Material	Días	V (cm/día)	VR (día/cm)	IVR min.	Alarma	R ²	Medida de Acción
PA8	Estéril	48	25.25	0.04	0.06	OK	0.0245	M
PA9	Estéril	41	4.78	0.21	0.06	OK	0.0562	M
PA10	Estéril	110	7.61	1.43	0.06	OK	0.1781	M
PA11	Estéril	76	0.52	1.93	0.06	OK	0.1473	M
PA12	Estéril	102	6.30	1.86	0.06	OK	0.2076	M
PA7	Estéril	168	9.10	3.60	0.06	OK	0.0351	M

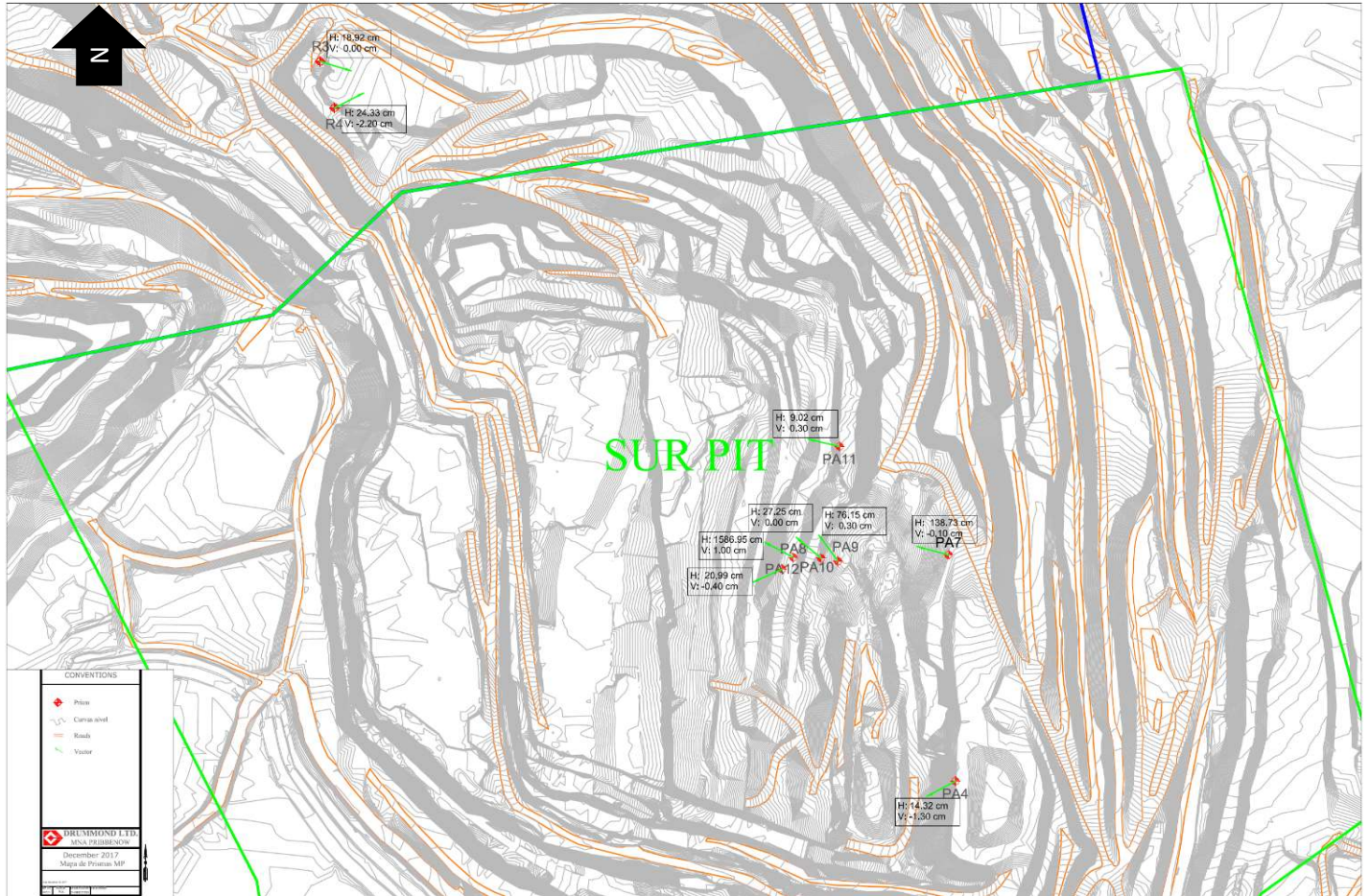
**M: Continuar monitoreo, R: Medida correctiva, E: Evacuar. (IVR = Inverso de la velocidad; V = Velocidad)

Conclusiones y recomendaciones

En cuanto a la zona de relleno en el sur (Prismas PA7, PA8, PA9, PA10, PA11 y PA12), los prisma PA8, PA9, PA10 Y PA12 presentaron movimientos significativos debido a deslizamientos ocurridos en el area, el Prisma PA8 fue monitoreado hasta el 20/10/20107, el PA9 hasta el 13/10/2017 y el PA11 hasta el 29/12/17, ambos retirados por operación minera. Los restantes se siguen monitoreando por si en algun momento se reactiva el deslizamiento (la zona esta estable en estos momentos de acuerdo a las correcciones realizadas)

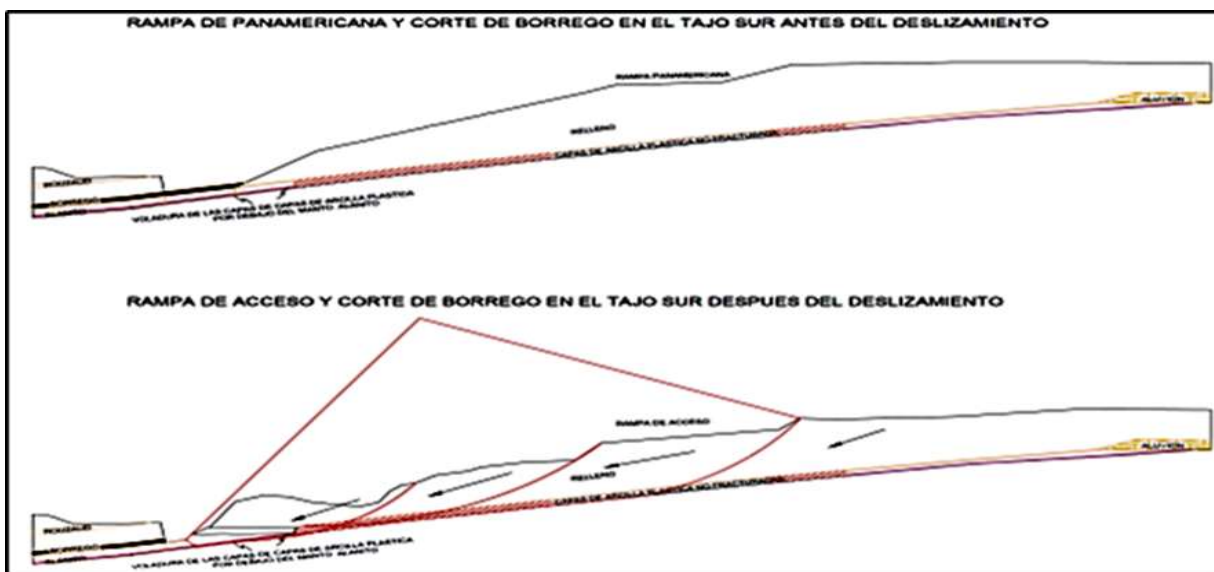
APENDICE A - MAPA DE PUNTOS DE CONTROL Y MECANISMO DE FALLA

Figura A-1: Mapa de vectores



Mecanismo de falla

El mecanismo de falla que se presentó en la zona sur fue exactamente falla circular compuesta, en la siguiente figura se aprecia lo dicho anteriormente.



APENDICE B - FIGURAS

Figura B1 (a): Desplazamiento Total diario (cm)

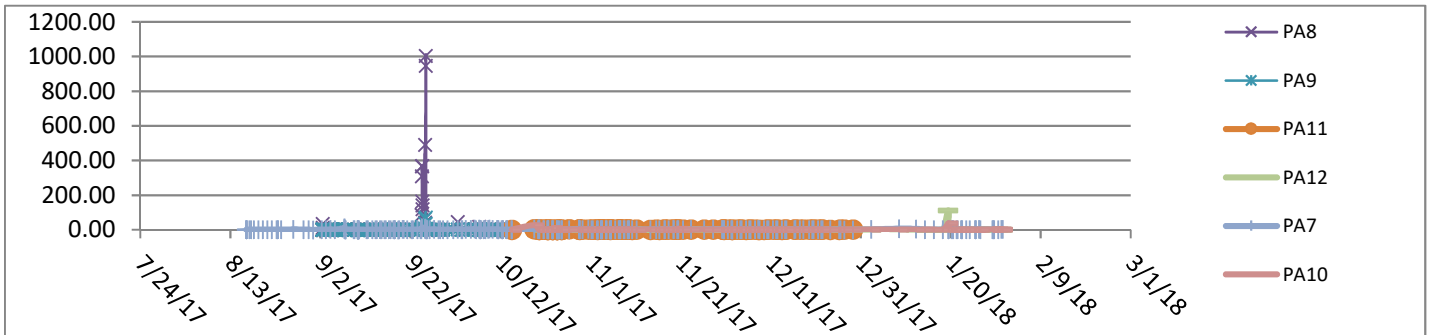
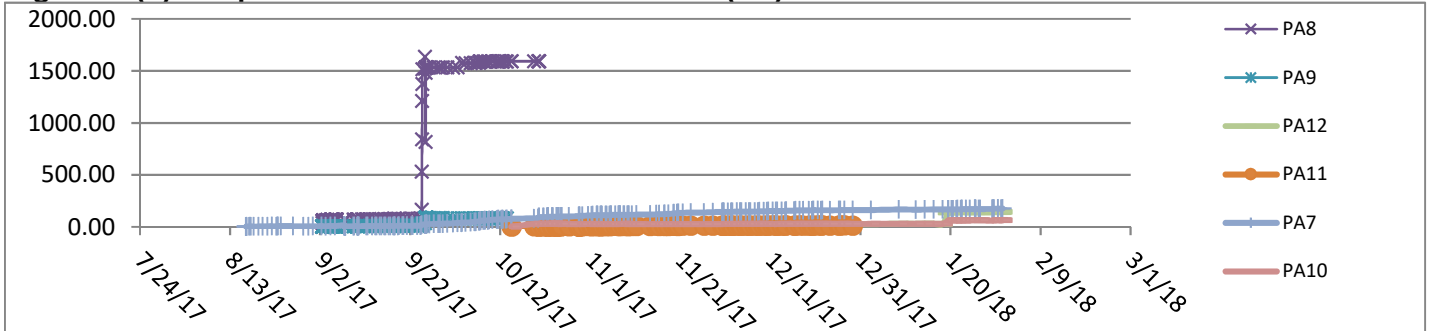


Figura B1(b): Desplazamiento acumulado Total diario (cm)



Se observa un desplazamientos 10m y 30 cm aproximadamente para el prisma PA8 y PA12 esto debido al deslizamiento ocurrido el 24 de septiembre 2017 y el 1 de enero 2018, para el restante las medida diarias son muy bajas y algunas oscilan debajo del error mínimo de equipo. El comportamiento agrupado no es lógico pues los puntos se ubican sobre diferentes áreas y materiales, esto revela que el registro es en su mayoría "ruido" producto del error intrínseco de medida y precisión del equipo.

Figura B1(c): Desplazamiento acumulado Total Prisma 8 (cm)

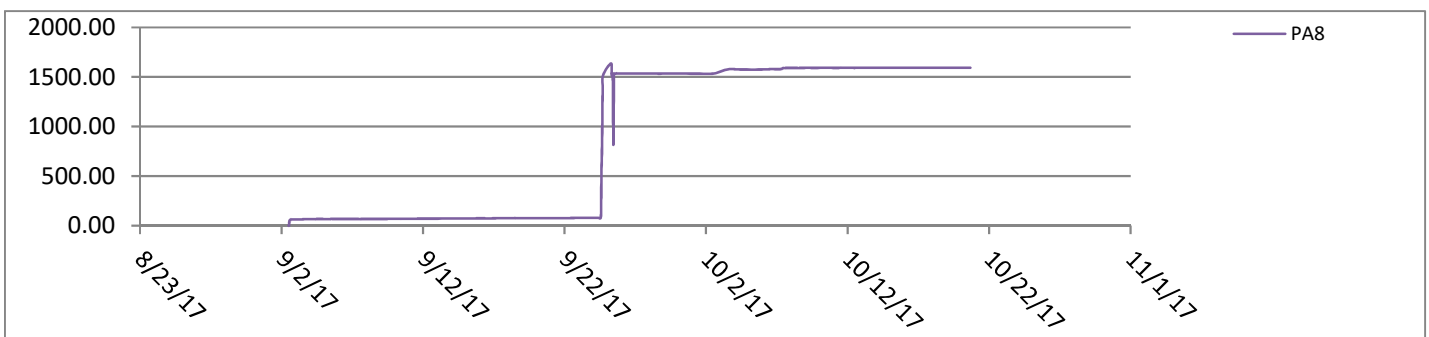
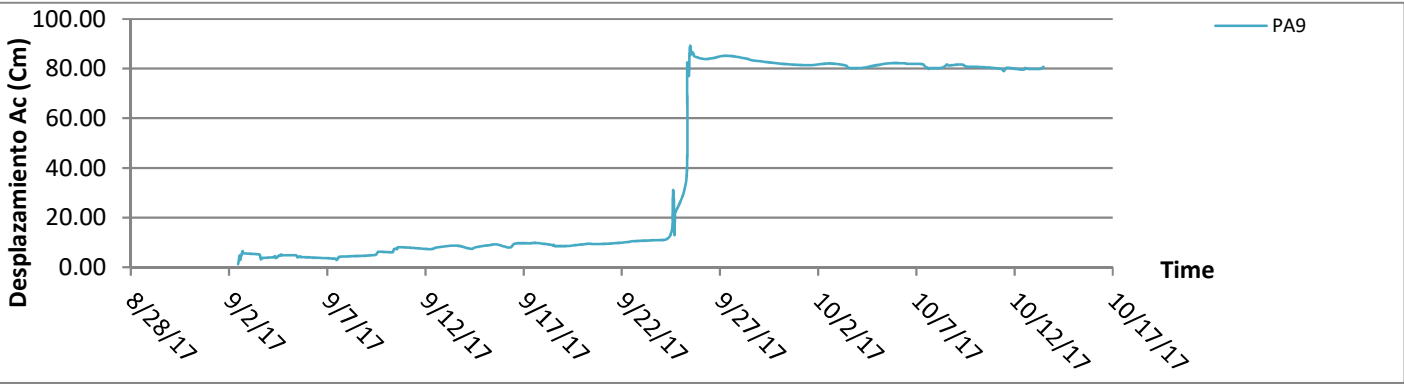
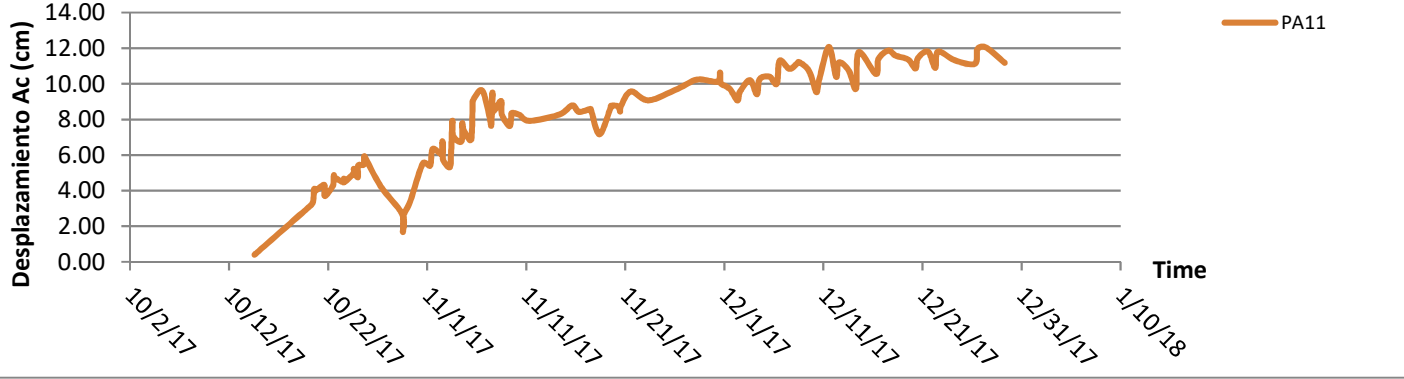


Figura B1(d): Desplazamiento acumulado Total Prisma 8 (cm)



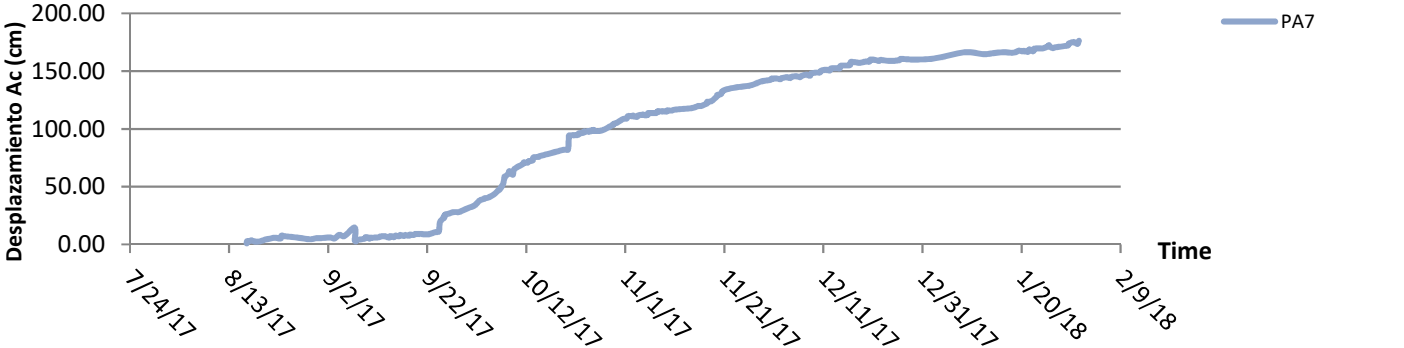
Los Prismas PA8 y PA9 evidencian el comportamiento del desplazamiento acumulado total y deslizamiento de la escombrera en su tiempo determinado desde el 24/09/17 hasta el 25/09/17

Figura B1(e): Desplazamiento acumulado Total Prisma 11 (cm)



Algunas medidas diarias para el PA11 son muy bajas y oscilan debajo del error mínimo de equipo . El comportamiento agrupado no es lógico, esto revela que el registro es en su mayoría "ruido" producto del error intrínseco de medida y precisión del equipo.

Figura B1(g): Desplazamiento acumulado Total Prisma 7 (cm)



Algunas medidas diarias para el PA7 son muy bajas y oscilan debajo del error mínimo de equipo . El comportamiento agrupado no es lógico, esto revela que el registro es en su mayoría "ruido" producto del error intrínseco de medida y precisión del equipo.

Figura B1: Desplazamiento acumulado Total diario Prisma 10 (cm)

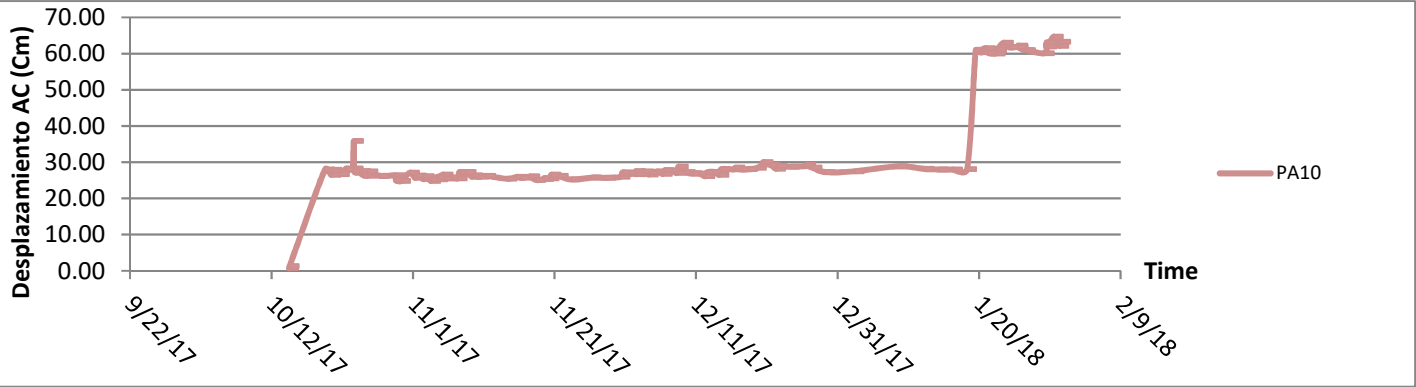
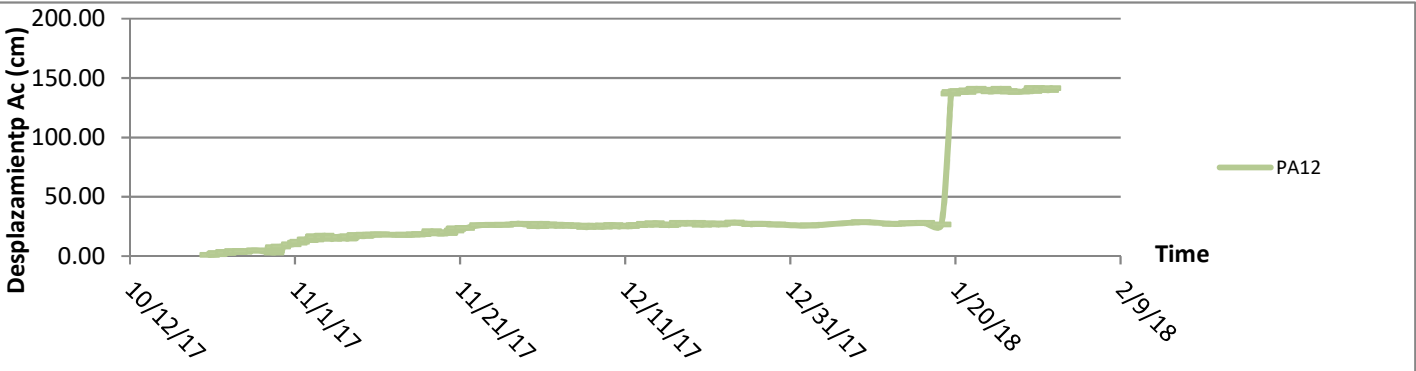
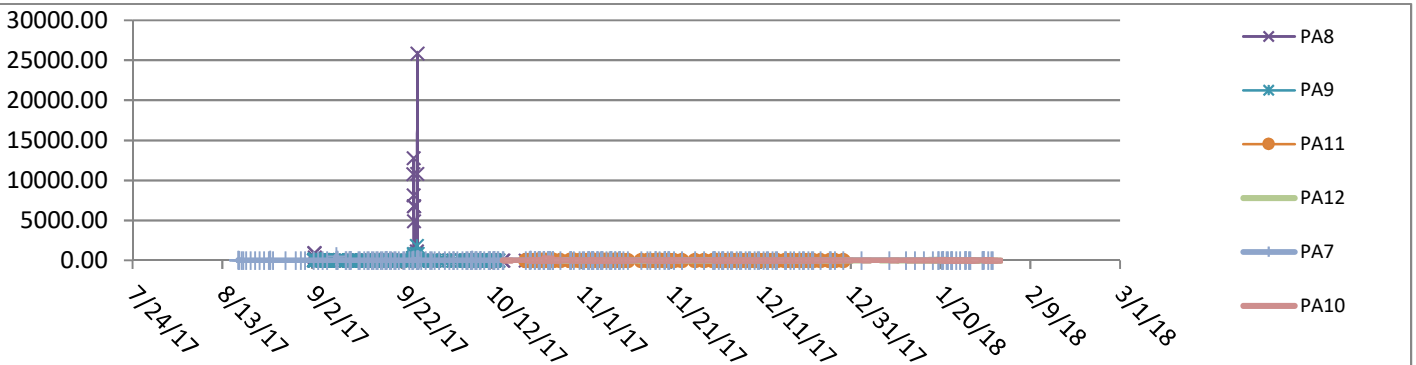


Figura B1(f): Desplazamiento acumulado Total Prisma 12 (cm)



Los Prismas PA10 y PA12 evidencian el comportamiento del desplazamiento acumulado total y deslizamiento de la escombrera en su tiempo determinado desde el 18/01/18 hasta el 19/01/18

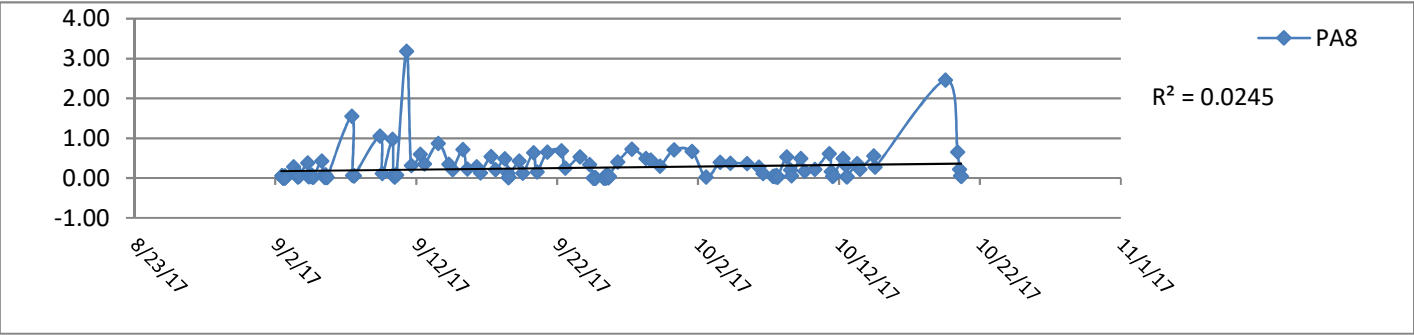
Figura B2: Velocidad (cm/día)



Se evidencian movimientos acelerados para el PA8 esto se debe al deslizamiento sufrido en el material , para los prismas restantes no se aprecian movimientos acelerados ni tendencias que evidencian algún proceso de inestabilidad en curso. El comportamiento agrupado no es lógico pues los puntos se ubican sobre diferentes áreas y materiales, esto revela que el registro es en su mayoría "ruido" producto del error intrínseco de medida y precisión del equipo.

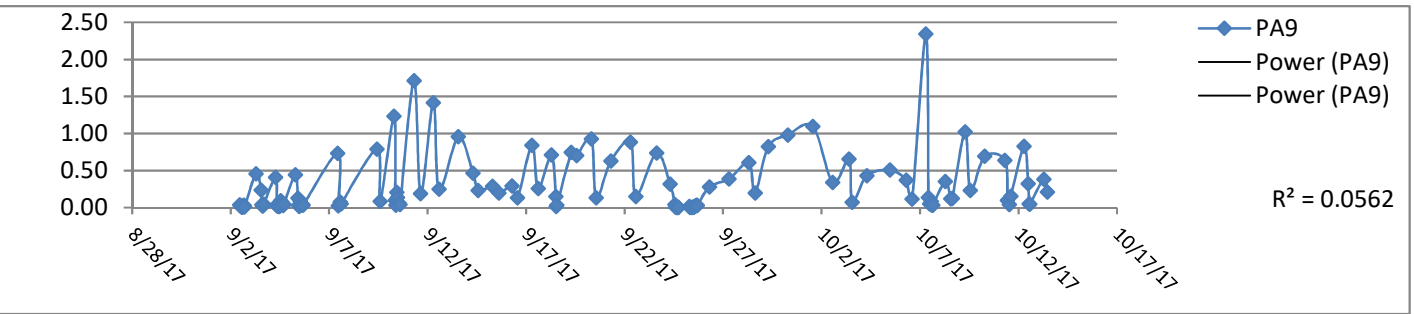
En las figuras B3 se aplica el criterio de Fukuzono para evaluar eventuales mecanismos de falla.

Figura B3(d): Inverso de la velocidad Prisma PA8 (dia/cm)



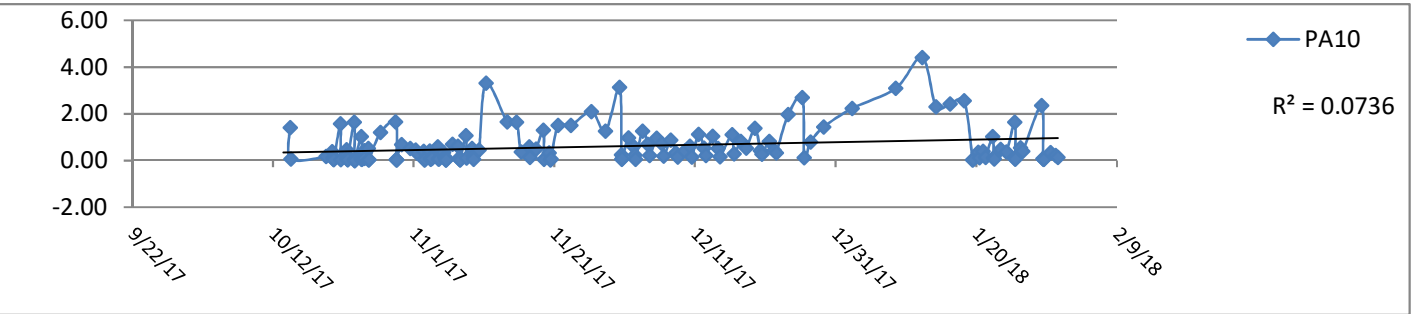
No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B3(e): Inverso de la velocidad Prisma PA9 (dia/cm)



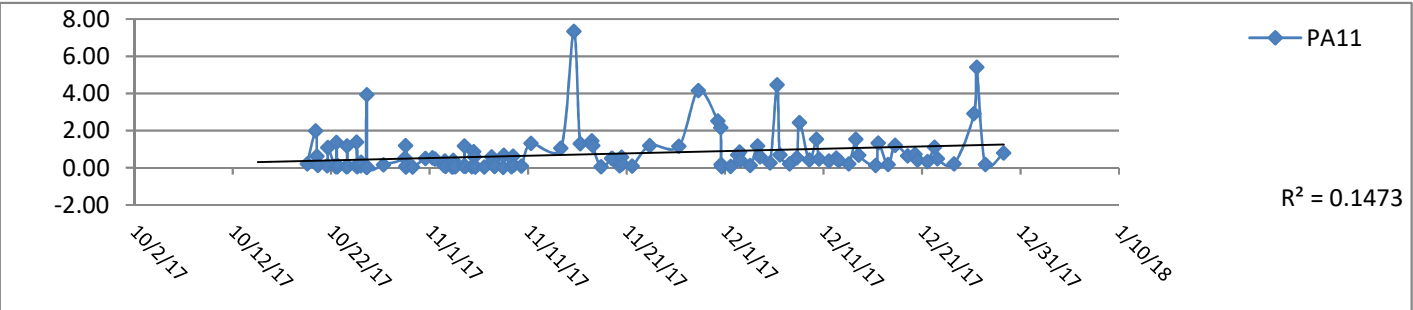
No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B3(f): Inverso de la velocidad Prisma PA10 (dia/cm)



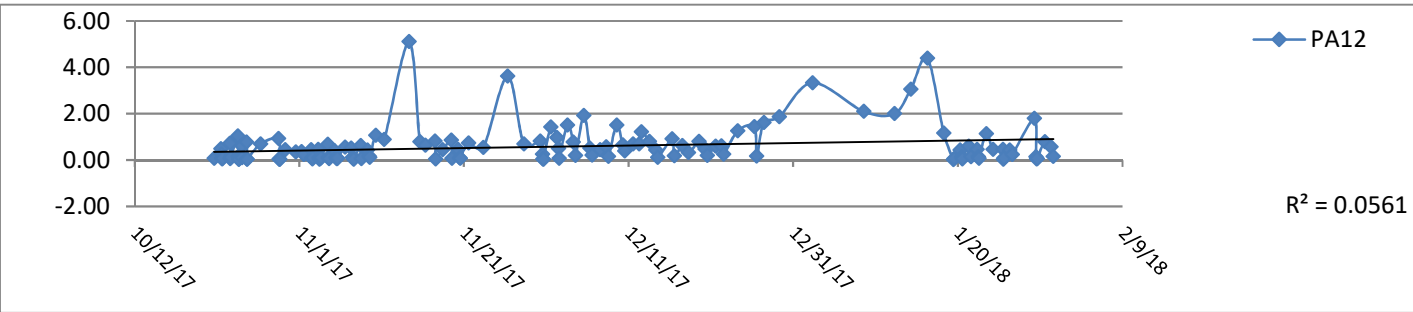
No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B3(f): Inverso de la velocidad Prisma PA11 (dia/cm)



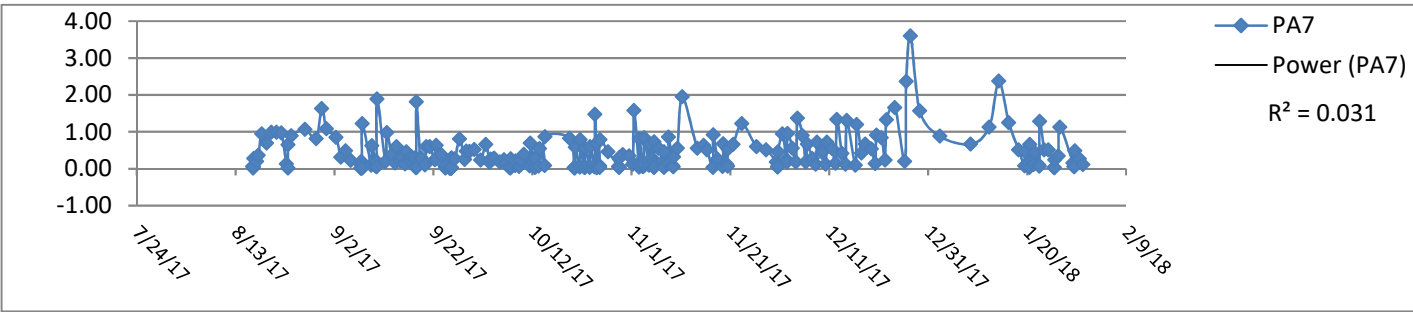
No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B3(g): Inverso de la velocidad Prisma PA12 (dia/cm)



No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B3(h): Inverso de la velocidad Línea PA7 (dia/cm)



No se observa una tendencia adversa. El inverso de la velocidad está muy por encima del límite mínimo admisible para Material Aluvial (0,06 día/cm).

Figura B4(b): Desplazamiento horizontal (cm)

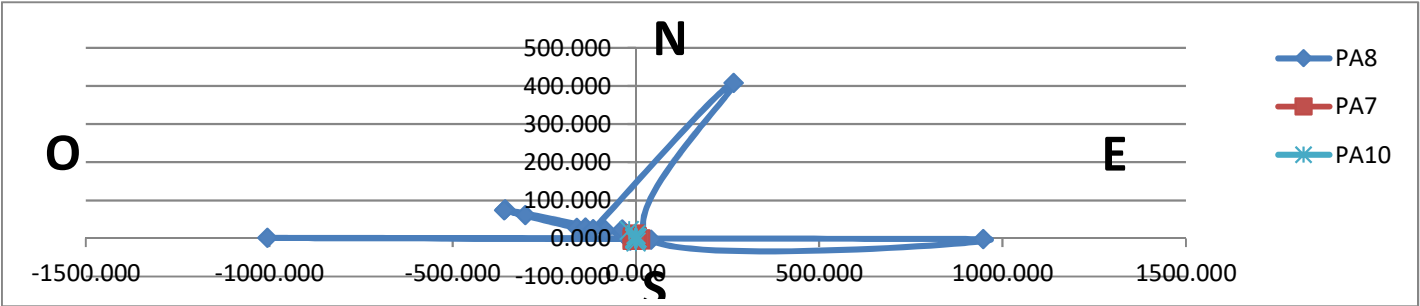
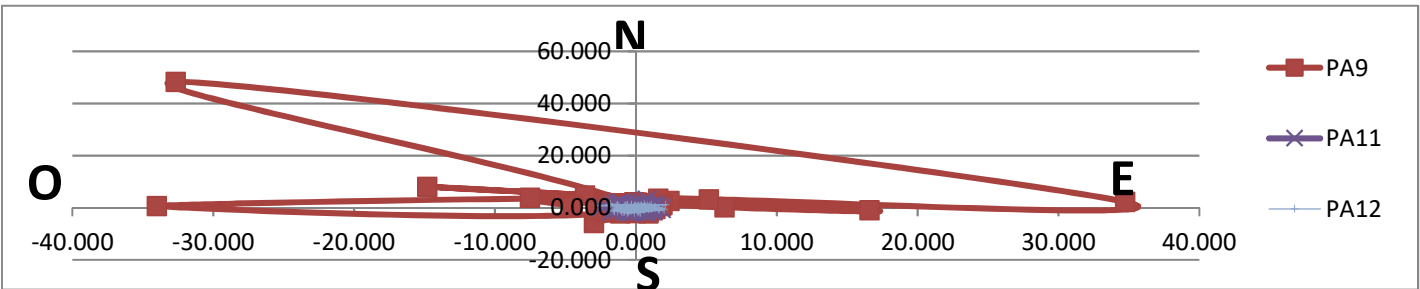
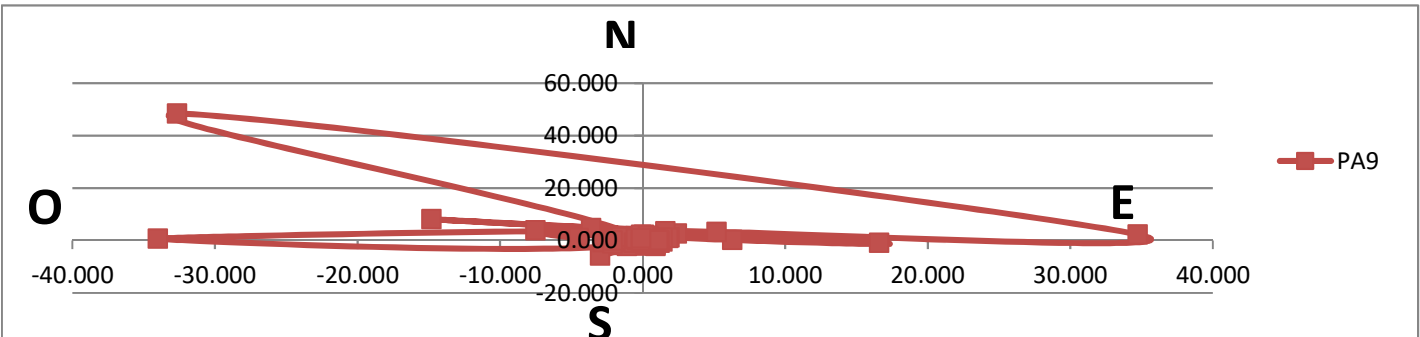


Figura B4(a): Desplazamiento horizontal (cm)



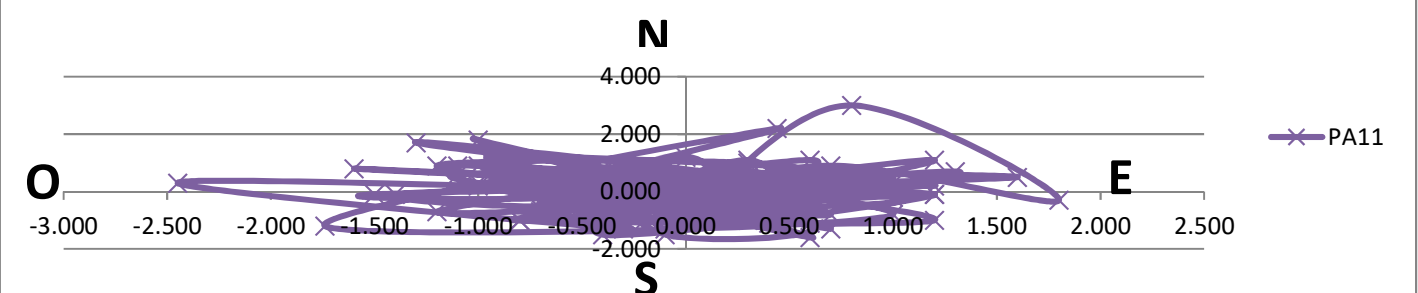
se aprecia desplazamientos superiores a los 30 cm para el prisma 9, esto debido al deslizamiento ocurrido el día 24/09/2018, para el prisma PA11 Y PA 12 Todas las trayectoria son dispersas, erráticas y alrededor del origen (0,0), esto indica que no existe una tendencia de inestabilidad lógica que pueda estar asociada a algún proceso de inestabilidad en curso.

Figura B4(a): Desplazamiento horizontal Prisma 9 (cm)



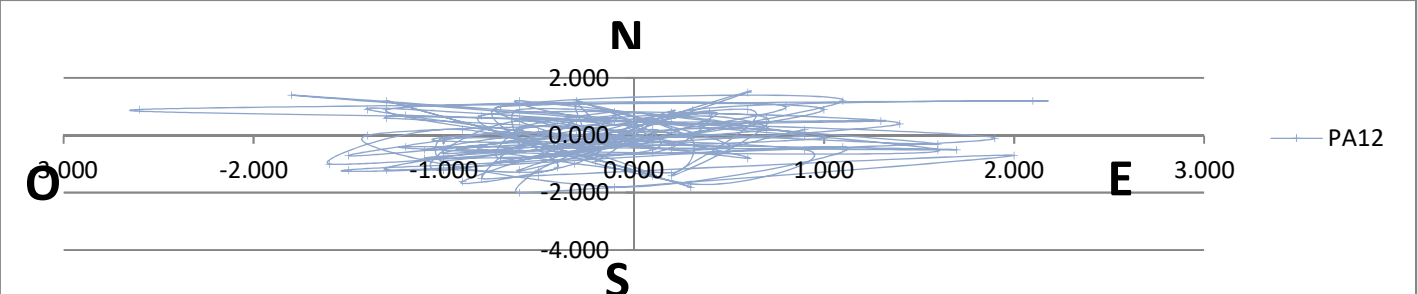
Se aprecian desplazamientos superiores a los 30 cm para el prisma 9 con tendencias hacia Este-Oeste , esto debido al deslizamiento ocurrido el día 24/09/2017.

Figura B4(a): Desplazamiento horizontal Prisma 11 (cm)



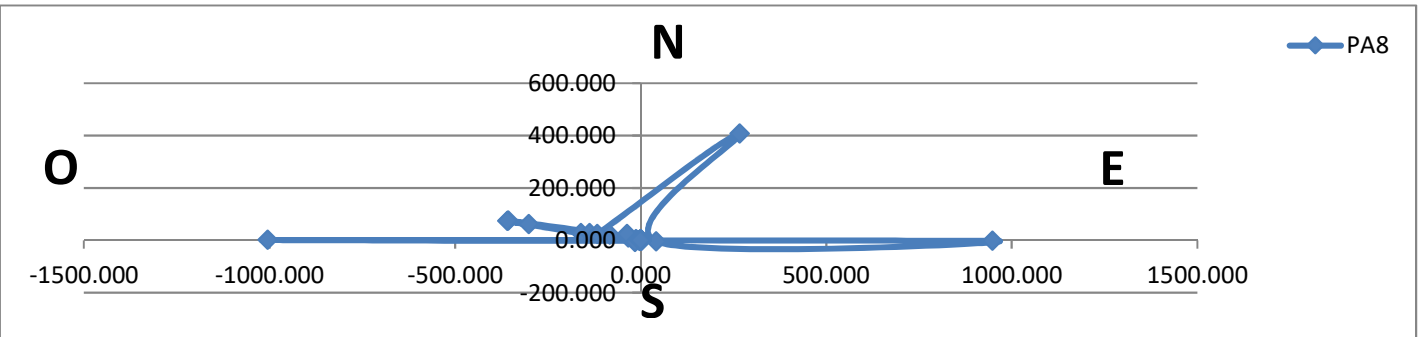
Todas las trayectoria son dispersas, erráticas y alrededor del origen (0,0), esto indica que no existe una tendencia de inestabilidad lógica que pueda estar asociada a algún proceso de inestabilidad en curso, producto del error intrínseco del equipo.

Figura B4(a): Desplazamiento horizontal Prisma 12 (cm)



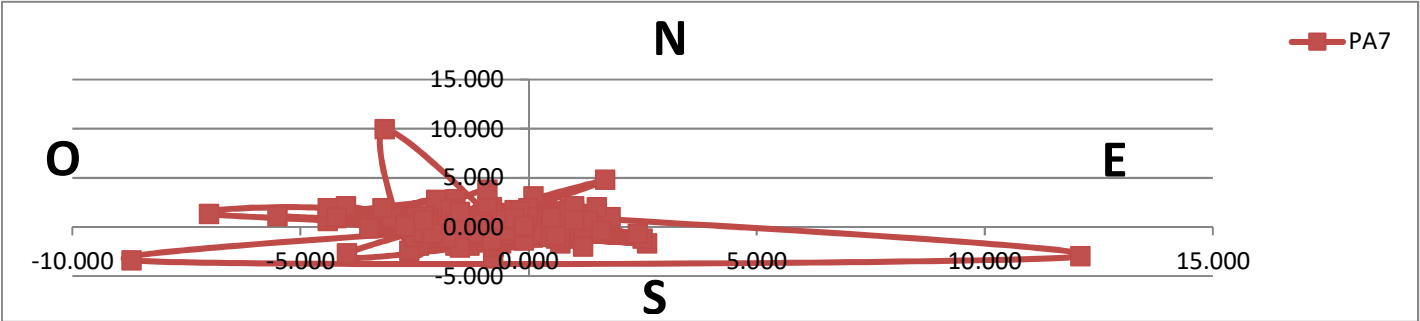
Se aprecian desplazamientos muy pequeños menor los 3 cm para el prisma 12 con tendencias hacia Este-Oeste, se puede deducir que para el deslizamiento ocurrido el día 18/01/2018 su desplazamiento principal fue hacia la vertical en su totalidad.

Figura B4(b): Desplazamiento horizontal Prisma 8 (cm)



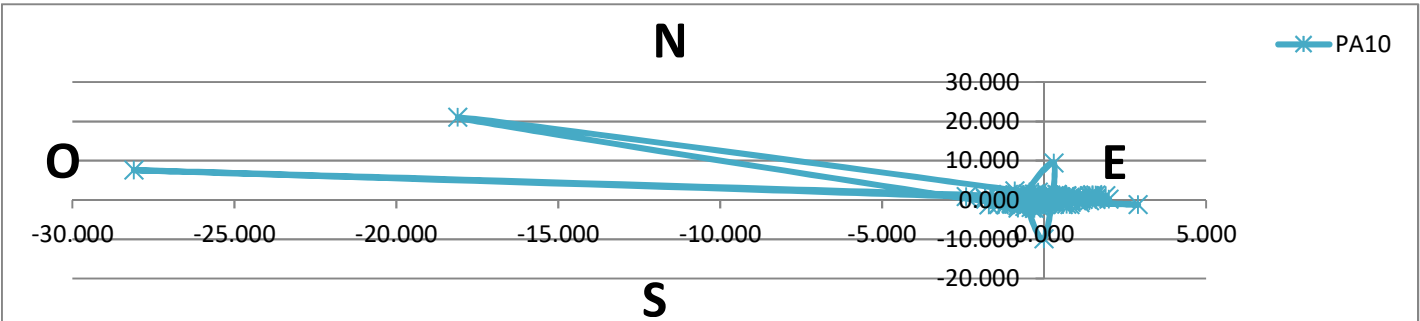
Se aprecia desplazamientos superiores a los 10m en un corto periodo de tiempo para el prisma 9 con tendencias hacia Este-Oeste, esto debido al deslizamiento ocurrido el día 24/09/2018.

Figura B4(b): Desplazamiento horizontal Prisma 7 (cm)



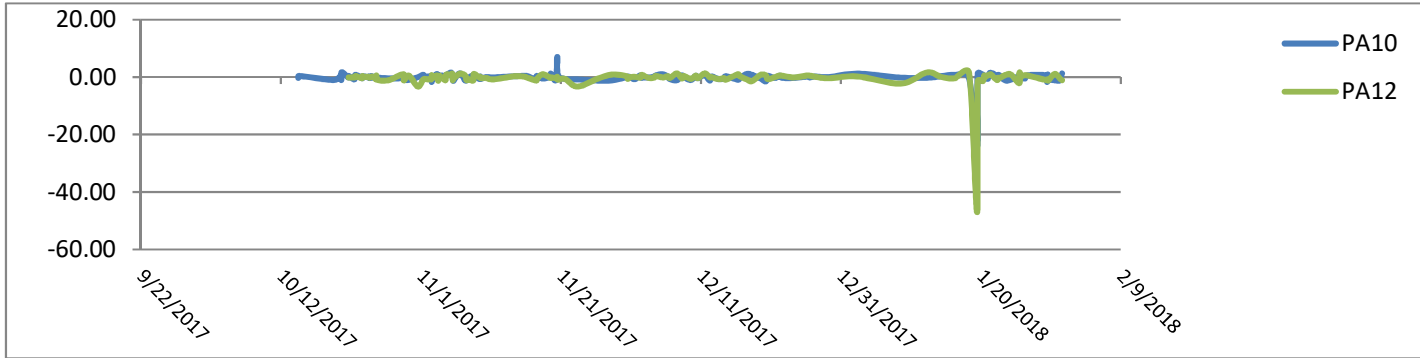
Se aprecia desplazamientos igual o menor a los 10 cm en un corto periodo de tiempo para el prisma 7 con tendencias hacia Este-Oeste, esto debido al deslizamiento ocurrido el día 24/09/2018.

Figura B4(b): Desplazamiento horizontal Prisma 10 (cm)



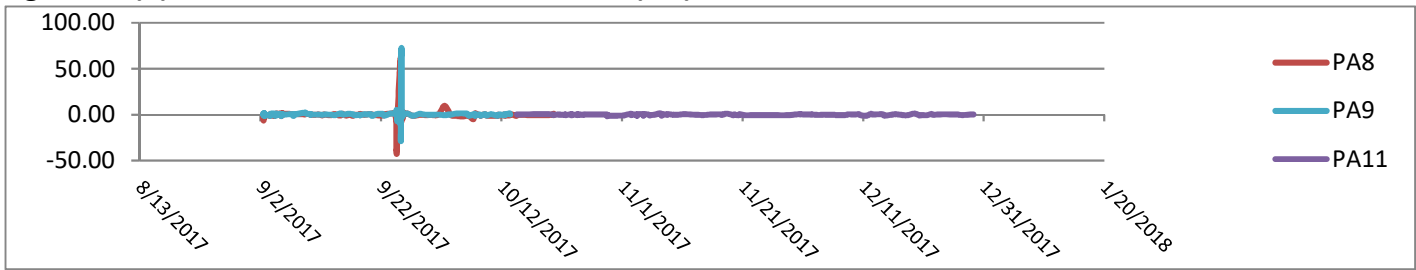
Se aprecia desplazamientos superiores a los 25 cm en un corto periodo de tiempo para el prisma 10 con tendencias hacia el Oeste, esto debido al deslizamiento ocurrido el día 18/01/2018, se concluye con esto que el deslizamiento en esta zona se movió mas horizontalmente.

Figura B5 (a): Dirección de movimiento vertical (cm)



Comparando la dirección del moviemiemento vertical, se puede observar que para la zona del prisma 12 el movimiento fue superior a la del prisma 10, lo que se infiere que el deslizamiento ocurrido en la fecha 18/01/2018, tuvo zonas de levantamientos e hundimeintos.

Figura B5 (b): Dirección de movimiento vertical (cm)



Comparando la dirección del movimiento vertical, se puede observar que para las zonas de los prismas 8 y 9 el movimiento fue muy similar entre ambos, lo que se infiere que el deslizamiento ocurrido en la fecha 24/09/2017, fue mayor en la componente horizontal.

Figura B5 (a): Dirección de movimiento vertical Acumulado Prisma 8 (cm)

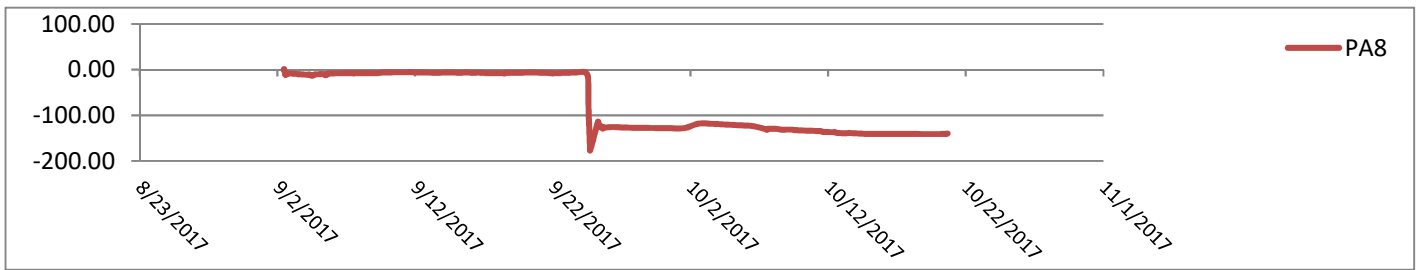
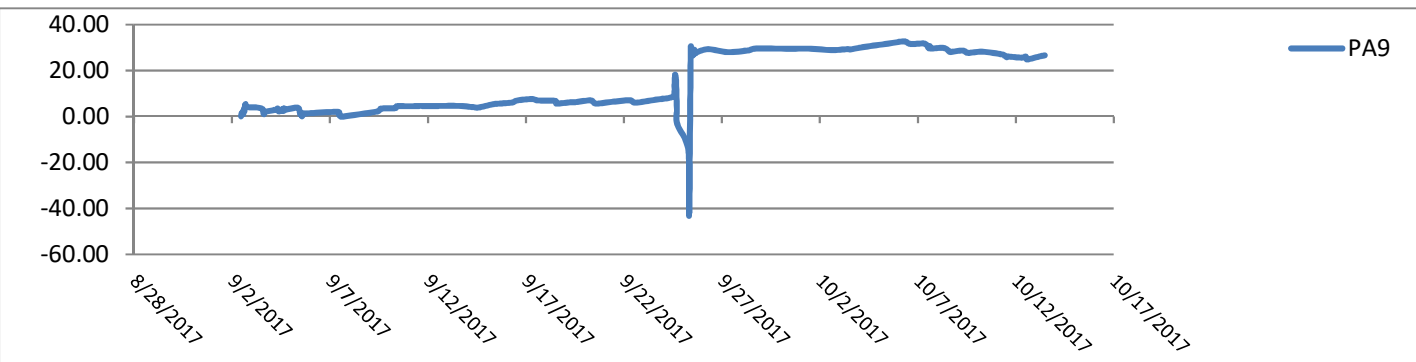


Figura B5 (b): Dirección de movimiento vertical Acumulado Prisma 9 (cm)



Los Prismas PA8 y PA9 evidencian el comportamiento del movimiento acumulado total vertical y deslizamiento de la escombrera en su tiempo determinado desde el 24/09/17 hasta el 25/09/17, hasta la fecha se mantiene estable.

Figura B5 (c): Dirección de movimiento vertical Acumulado Prisma 10 (cm)

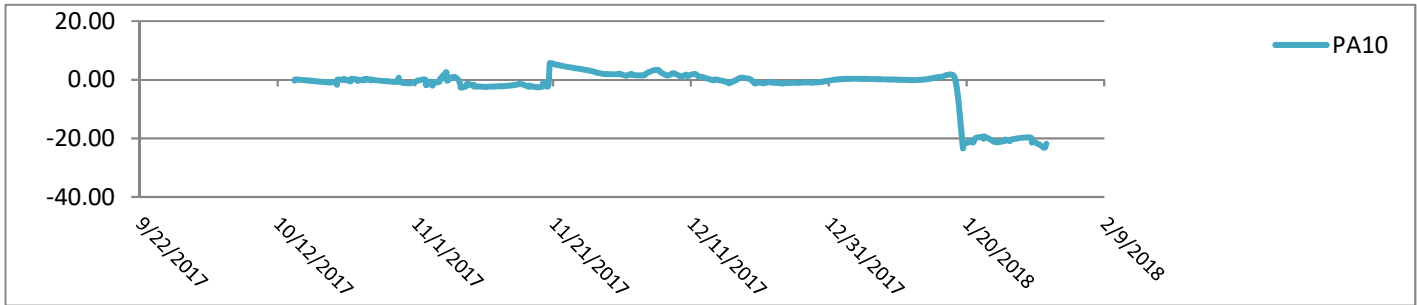
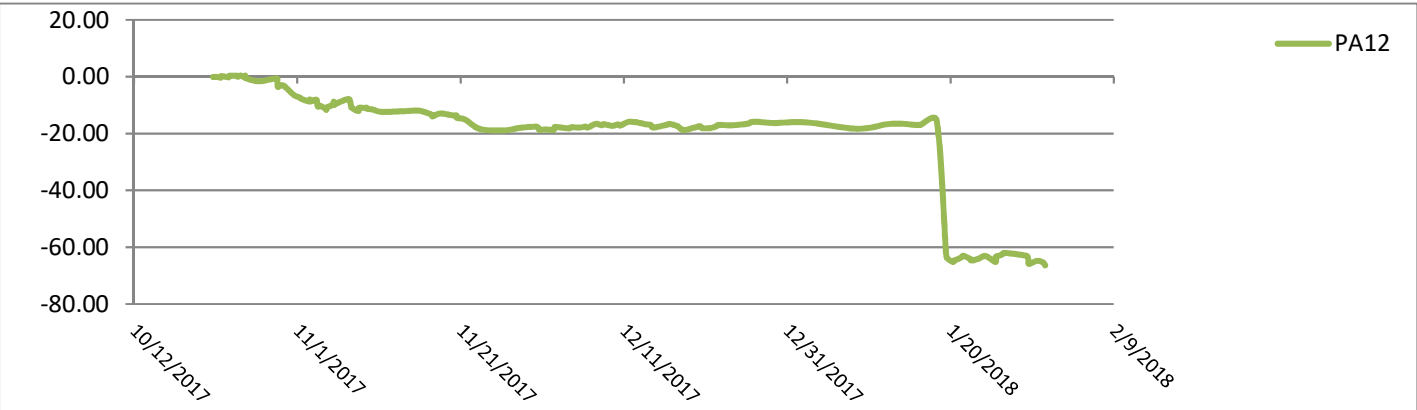


Figura B5 (d): Dirección de movimiento vertical Acumulado Prisma 12 (cm)



Los Prismas PA10 y PA12 evidencian el comportamiento del movimiento acumulado total vertical y deslizamiento de la escombrera en su tiempo determinado desde el 18/01/18 hasta el 19/01/18, hasta la fecha se mantiene estable.

Figura B5 (e): Dirección de movimiento vertical Acumulado Prisma 7 (cm)

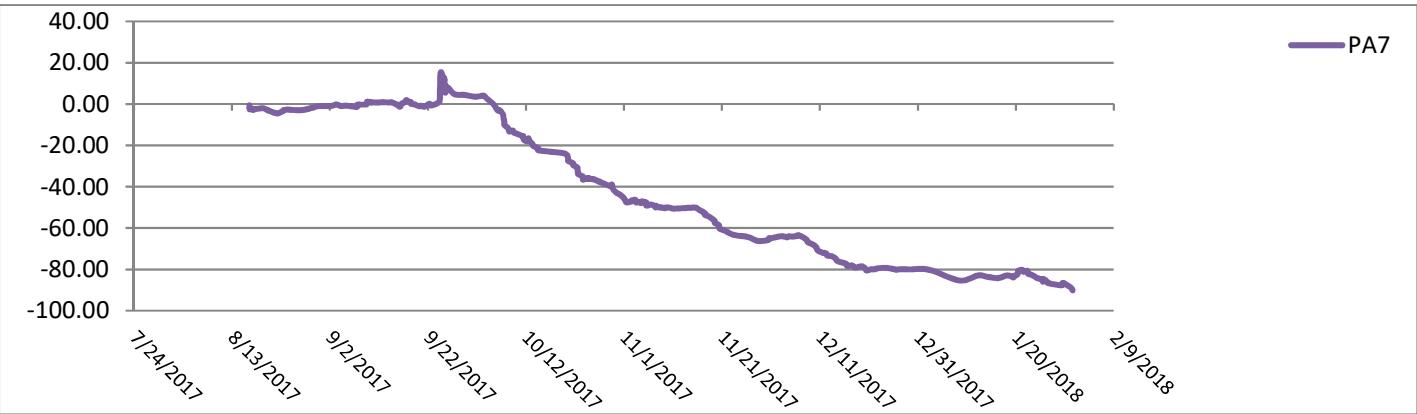
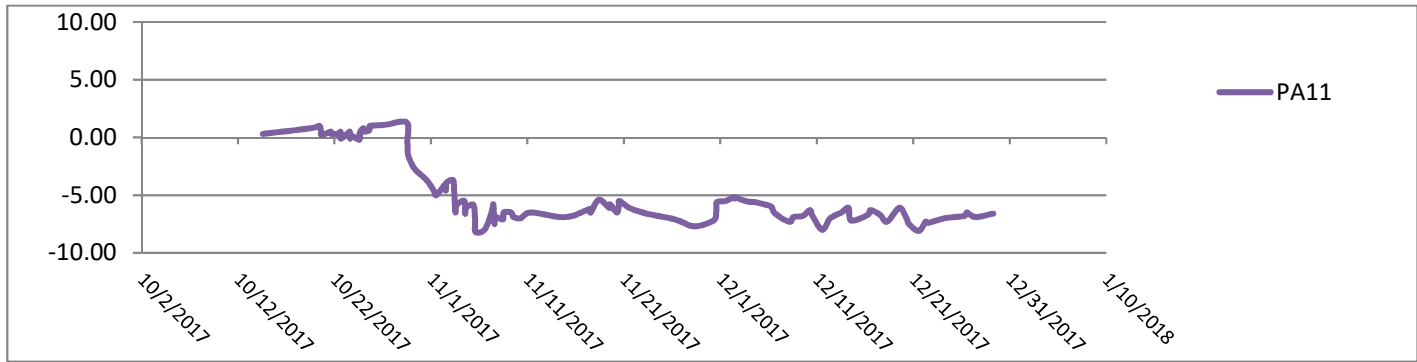
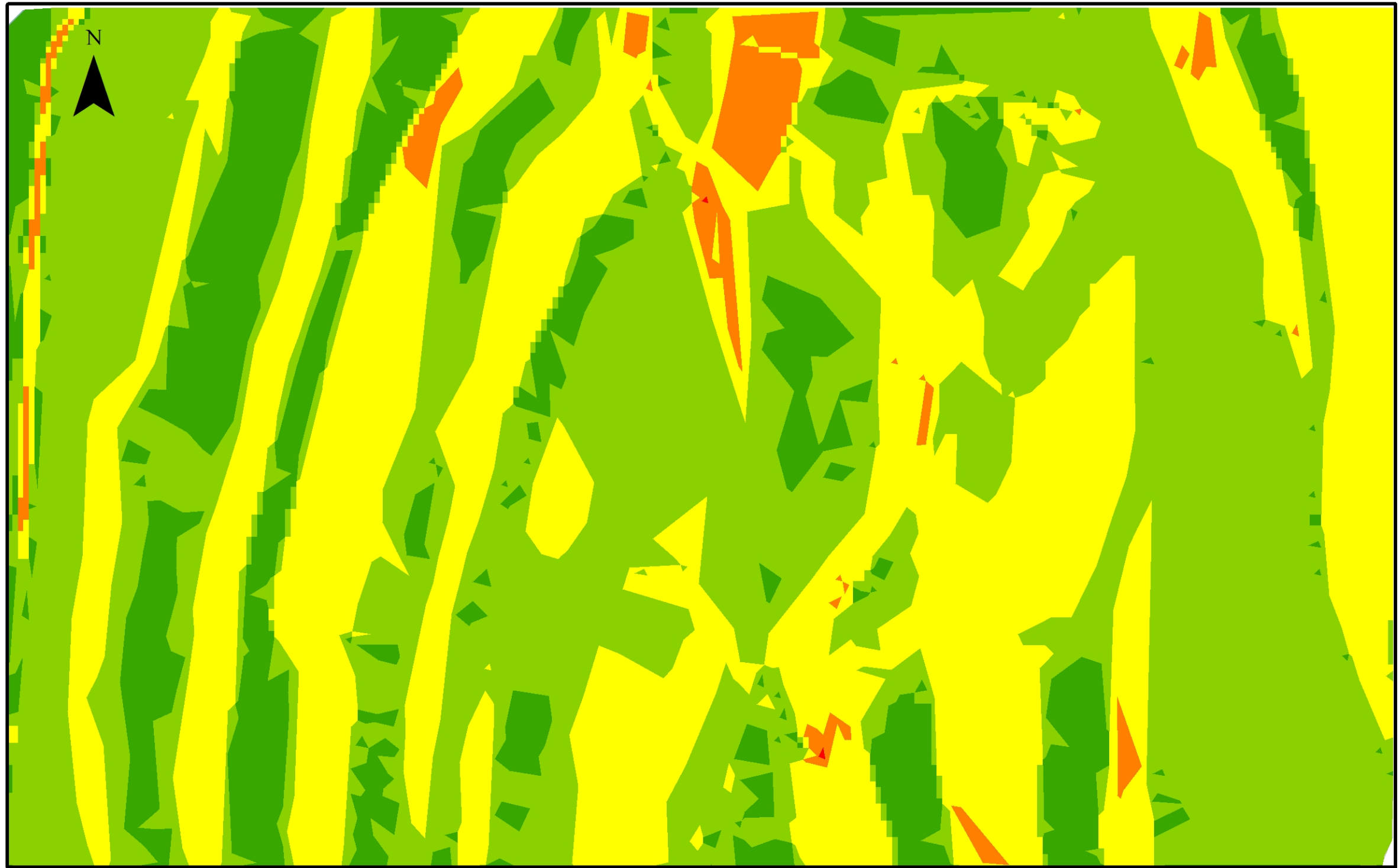


Figura B5 (f): Dirección de movimiento vertical Prisma Acumulado 11 (cm)








Para los prismas 7 y 11, La baja magnitud del desplazamiento acumulado y el comportamiento agrupado revelan el error intrínseco de medida y precisión del equipo.

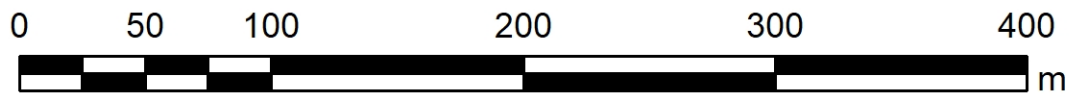
ANEXO C: AMENAZA



Legend

Rango

- | | | |
|---|-------|-------------------------------------|
|  | 0-3 | Plano (Sin amenaza) |
|  | 3-12 | Ligeramente Inclinado (Sin amenaza) |
|  | 12-30 | Deslizamiento (Baja amenaza) |
|  | 30-45 | Deslizamiento (Media amenaza) |
|  | >45 | Caída Libre (Alta amenaza) |



1:3.000

ANEXO D: ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

